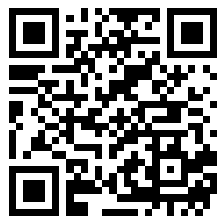

This is a reproduction of a library book that was digitized by Google as part of an ongoing effort to preserve the information in books and make it universally accessible.

GoogleTM books

<https://books.google.com>





A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

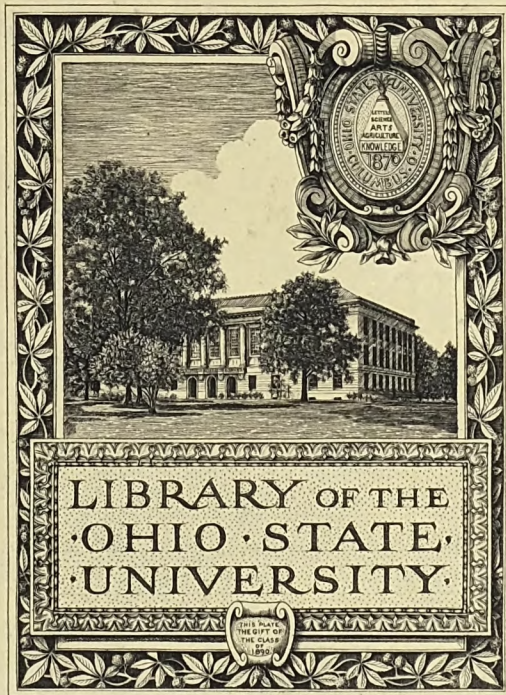
Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

- + *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.
- + *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.
- + *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.
- + *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse <http://books.google.com>



J. E. French del 1918.

A. N. Macdonald sc.

OHIO STATE
UNIVERSITY
OCT 9 1930
LIBRARY

BULLETIN DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886

Chèques postaux Paris 170-28

Siège social

et Laboratoire central d'Electricité

14, Rue de Staël
PARIS

Téléphone Ségur 08-68



Siège administratif

et Ecole Supérieure d'Electricité

8 à 14, Av. Pierre-Larousse
MALAKOFF (Seine)

Téléphone Vaugirard 11-65

4^e Série (Tome X)

N° 107. - Juillet 1930

DANS CE NUMÉRO :

Communications techniques

Détermination des données caractéristiques des transformateurs,
M. Paul BUNET.

Stations centrales et sous-stations automates, M. D'AUDEVILLE.

Quelques particularités des redresseurs modernes, (M. ROY).

Un nouveau dispositif de mesures en courant alternatif musical ; le potentiomètre-phasemètre, applications à la phonométrie, M. NANDILLON.

Les applications de la traction par accumulateurs aux poids lourds,
M. GASQUET.

Bibliographie

Roger BOSSÉ, Éditeur

12, Rue Bachaumont, PARIS

Mensuel

PRIX : 12 Francs

OHIO STATE
UNIVERSITY

Société Française des Électriciens

Société reconnue d'utilité publique par décret du 7 Décembre 1886

Siège Social : 14, Rue de Staël - PARIS (XV^e)

Siège administratif : 8 à 14, av. Pierre-Larousse - MALAKOFF (Seine)

La Société publie, depuis 1884, un bulletin dont la collection contient les comptes rendus des Séances publiques et des Séances de Sections et qui permet ainsi de reconstituer toute l'histoire de l'électrotechnique.

Elle tient chaque année dix séances publiques où des conférences (accompagnées d'expériences), sont faites par ses Membres les plus qualifiés, et une semaine de discussions où sont passées en revue les questions d'actualité à l'ordre du jour.

Elle a créé, en 1924, un Groupe Sud-Est (Grenoble, Lyon, Saint-Etienne) et un Groupe Sud-Ouest (Bordeaux) et en 1928 un Groupe de Toulouse.

Elle organise, pour ses Membres, des visites d'usines, voyages en France et à l'Etranger.

Elle a fondé :

En 1888, le Laboratoire central d'Electricité consacré aux recherches scientifiques et aux essais industriels, 14, rue de Staël, à Paris.

En 1894 l'Ecole supérieure d'Electricité, actuellement 14, avenue Pierre-Larousse, à Malakoff.

AVANTAGES RESERVES AUX MEMBRES

Bulletin mensuel de 112 pages environ.

Convocation aux Séances publiques de la Société.

Convocation, sur demande, aux Séances mensuelles des 6 Sections techniques du Comité ; service de leurs procès-verbaux.

Libre usage de la Bibliothèque, de 15 000 volumes, 14, Avenue Pierre-Larousse, à Malakoff.

Documentation, traductions, reproductions au photostat des documents de la Bibliothèque ; rémunération suivant l'importance et la nature du travail demandé.

Placement : les offres et demandes d'emploi émanant des Membres de la Société sont publiées dans les convocations mensuelles aux Séances publiques.

COTISATIONS ANNUELLES

	<i>France et Colonies françaises</i>	<i>Etranger</i>
Membres individuels	100 f	125 f
Sociétés et groupements scientifiques et industriels	200 f	250 f
Elèves des établissements supérieurs d'enseignement électrotechnique au cours de leurs études et pendant les trois années qui suivent leur sortie	50 f	75 f

Pour les demandes d'admission et tous renseignements, s'adresser 14, avenue Pierre-Larousse à Malakoff.

PUBLICITE : Roger Bossé, chef de publicité, 12, rue Bachaumont, Paris. Gut. 04-12.

ABONNEMENTS : France 120 f. Etranger 150 f. Union postale 150 f., 12, rue Bachaumont, à Paris. Autres pays.. 170 f.,

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS

SOMMAIRE

COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS :

Réunion ordinaire mensuelle du Mercredi 7 Mai 1930, p. 702.
Admissions des Membres titulaires, p. 702.
Membre décédé, p. 703.

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

Détermination de données caractéristiques des transformateurs (M. BUNET), p. 705.
— Stations centrales et sous-stations automatés (M. d'AUDEVILLE), p. 732. —
Quelques particularités des redresseurs modernes (M. ROY), p. 765. —
Un nouveau dispositif de mesures en courant alternatif musical : le potentiomètre-phasemètre, applications à la phonométrie (M. le Lieutenant de Vaisseau NARDILLON), p. 777. — Les applications de la traction par accumulateurs aux poids lourds (M. GASQUET), p. 798.

OUVRAGES OFFERTS À LA SOCIÉTÉ, p. 803.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 804.

IL Y A TRENTÉ ANS, p. 812.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

La reproduction des mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des Auteurs.

Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant le manuscrit.

4^e série, tome X, n° 107.

COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du Mercredi 7 Mai 1930

Présidence de M. PARODI

La séance est ouverte à 20 h. 45.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

MM.

- Bouzon** (Raymond, Ferdinand), Ingénieur, chef du service Electrique de la Société des Houillères de Montrambert et de la Béraudière de Saint-Etienne, rue Edgard Quinet, La Basse-Jomayère, à Saint-Etienne (Loire). — Présenté par MM. Viel et Ledoux.
- Brogie** (Louis, Victor de), Maître de conférences à la Sorbonne, 94, rue Péronet, (2, rue Martin-de-Thézillat), Neuilly-sur-Seine (Seine). — Présenté par MM. Mercier et Gratzmuller.
- Burat** (Georges, Fernand), Ingénieur à la Société Fusion des Gaz, 42, rue de Paradis. Domicile : 7, rue Montcalm, à Paris (18^e). — Présenté par MM. Debout et Delebecque.
- Cazala** (André, Marie, Antoine, Gaston), Ingénieur I. E. T., Services techniques de l'Exploitation, Compagnie d'Orléans à Paris 28, rue Charles-Floquet, à Vitry-sur-Seine). — Présenté par MM. Lachaise et Magrin.
- Demory** (Jacques), Ingénieur à la Compagnie Electro-Mécanique, 41, rue François-Ier, à Paris 8^e. — Présenté par MM. Leboucher et G. Darrieus.
- Denina** (Ernesto), Professeur d'Electrochimie d'Electro-metallurgie et de Physico-chimie à l'Ecole Polytechnique de Turin, Lab. di Elettrochimica-R. Politecnico-Via Ospedale 32, à Turin (Italie). — Présenté par MM. Grosselin et Parodi.
- Leibovici** (Guillaume), Ingénieur à la Compagnie des Lampes, 52, rue Franklin, à Ivry. Domicile : 21, rue Albouy, à Paris (10^e). — Présenté par MM. Janet et Jouaust.
- Odelin** (Henri, Marie, Jules, René), Elève à l'E. S. E., 77, boulevard de Montmorency, à Paris (16^e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Stouls** (Pierre, Lucien), Agent régional des Etablissements D. Soulé de Bagnères-de-Bigorre, 13, rue Garibaldi, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Viel et Ledoux.
- Unne** (Georges, Pierre), Administrateur-délégué de la Société Le Transformateur, 22, boulevard Flandrin, à Paris (16^e). — Présenté par MM. Buret et Barusta.

Vignes (Jean, Emile), Elève à l'E. S. E., 197, avenue Gambetta, à Paris (20^e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Villeneuve (Joseph), Ingénieur Principal des chemins de fer du Midi (Traction), 14, rue Picpus, à Paris (12^e). — Présenté par MM. Bachellery et Leboucher.

Sans opposition de la part des Membres présents, ces candidats sont élus Membres titulaires de la Société.

M. LE PRÉSIDENT fait part du décès de M. LÉPINE, administrateur-délégué de la Société Hydro-électrique de Fure et Morge et de Vizille, Président de la Chambre de Commerce de Grenoble, et adresse à la famille du disparu les condoléances de la Société.

Il fait part également de la promotion de M. C.-F. Guilbert, sous-directeur de l'E.S.E., comme officier dans l'ordre de la Légion d'Honneur et lui transmet les félicitations de la Société.

M. LE PRÉSIDENT annonce que, vu le petit nombre de participants inscrits pour le voyage dans les Pays-Bas, celui-ci a dû être supprimé.

Il rappelle que le 30 avril dernier, la Médaille Mascart a été remise à M. Janet, dans l'amphithéâtre de l'Ecole.

M. LE PRÉSIDENT présente ensuite en ces termes le conférencier, M. Huber-Stockar :

Nous avons organisé une série de conférences sur « La Traction électrique » pour permettre aux membres de notre Société de se rendre compte de son développement dans les divers pays d'Europe. Nous allons, ce soir, entendre M. Huber-Stockar parler de l'*Electrification des chemins de fer fédéraux suisses*.

Je n'ai pas à vous présenter M. Huber-Stockar : vous savez la part qu'il a prise à l'électrification des chemins de fer fédéraux dont il a été le principal animateur, et je m'empresse de lui passer la parole.

M. Huber-Stockar retrace le développement atteint par l'électrification sur les chemins de fer fédéraux ⁽¹⁾.

M. LE PRÉSIDENT remercie le conférencier en ces termes :

Je suis certain d'être votre interprète à tous en remerciant M. Huber-Stockar de la conférence si remarquable qu'il vient de nous faire et qui

(1) Cette communication sera publiée in extenso dans un Bulletin ultérieur.

contient un très grand nombre de renseignements techniques et statistiques des plus importants.

Il nous a montré que l'électrification des chemins de fer fédéraux suisses, réalisée en employant des procédés différents de ceux employés en France, fonctionne néanmoins d'une façon parfaite tant au point de vue purement technique qu'au point de vue économique.

Je veux toutefois signaler une lacune très importante dans l'exposé que vous venez d'entendre : M. Huber-Stockar a omis de nous parler du rôle éminent qu'il a joué dans la préparation, dans l'étude et la réalisation de ces installations et le moins que l'on puisse dire est qu'il a été l'animateur de cette œuvre admirable.

Sa foi a su vaincre des résistances qui existaient en Suisse comme chez nous, à l'origine, contre la traction électrique, et je me plais à rendre ici hommage à l'Energie, à la Science de M. Huber-Stockar dont la valeur égale la modestie.

M. MILLE, Ingénieur, Chef du Service Electrique de la Société des Mines de Lens, présente ensuite sa communication sur *La Traction à accumulateurs dans les Mines considérée comme un problème de rationalisation industrielle* (1).

M. LE PRÉSIDENT remercie M. MILLE de sa très intéressante communication et se permet d'exprimer le souhait que nous ayons quelque jour, l'occasion de voir et de visiter les installations de traction par accumulateur qu'il a su réaliser et dont il peut être très justement fier.

La séance est levée à 23 h. 15.

(1) Cette communication paraîtra in-extenso dans un Bulletin ultérieur.

DÉTERMINATION DE DONNÉES CARACTÉRISTIQUES DES TRANSFORMATEURS ⁽¹⁾

Essais de court-circuit. — Variation de tension. — Pertes supplémentaires dans les conducteurs et leurs variations avec la température.

par M. Paul BUNET

Cette note a pour origine diverses questions posées à son auteur par différentes personnes ayant à effectuer des mesures sur les transformateurs, qui éprouvèrent quelques difficultés d'applications de règles et de formules ou qui diffèrent d'opinion avec des collègues. Les règles ordinairement suivies ici sont celles de l'Union des Syndicats de l'Electricité; la Chambre syndicale des constructeurs de gros matériel a fait également des publications au sujet des essais et de leur interprétation. Les textes ainsi parus représentent un gros et bon travail de classement qui rend de grands services et précise suffisamment la marche à suivre ordinairement. Cependant, dans certains cas, une précision plus grande serait désirable; ce sont de tels cas que nous exposons. Ils ne sont pas exceptionnels et leur apparition résulte des valeurs mêmes considérées comme normales ou acceptables pour les diverses constantes caractéristiques des appareils.

Une précision des résultats auxquels conduisent les mesures est d'autant plus nécessaire que des règles strictes et assez étroites fixent une tolérance extrême dite pour erreurs de mesures et inexactitudes, puis des valeurs limites pouvant entraîner le refus des appareils.

La présente note peut être considérée en grande partie comme une suite de communications faites à notre société, celles de M. Roth notamment (les pertes supplémentaires dans les machines électriques, août-septembre-octobre 1923) qui ont reçu des compléments d'un certain nombre de nos collègues; nous citerons ainsi celle de M. Ricalens (pertes dans les machines électriques août 1926).

1. — MÉTHODE DU COURT-CIRCUIT.

On met un enroulement de transformateur en court-circuit et on alimente l'autre à la fréquence normale; on observe la tension et la puissance à appliquer en fonction des courants dans les deux enroulements. Très souvent, afin d'éviter des erreurs dues aux impédances des connexions et appareils de mesure, surtout si l'un des enroulements est de tension faible ou de petite résistance, on met directement cet enroulement en court-circuit franc, sans ampèremètre, en faisant seulement des mesures sur l'autre enroulement.

(1) Communication présentée à la séance de la 1^{re} section du 15 janvier 1930, pour être discutée à la Semaine annuelle de discussion, le mercredi 26 novembre 1930.

Les relevés ainsi effectués sont appliqués pour la détermination de la chute de tension, et aussi pour la détermination des pertes réelles, dans le cuivre et autres assimilables de forme $r I^2$, r étant une résistance globale, ramenée à l'un des circuits, ainsi mesurée.

2. — OBJECTIONS ET PRÉCISIONS NÉCESSAIRES.

Une objection immédiate est celle-ci : si nous avons un courant I_2 dans le secondaire, en service ordinaire, I_1 sera le courant primaire correspondant. Mais lorsque nous ferons passer dans le secondaire en court-circuit le courant I_2 , nous aurons dans le primaire un courant I'_1 , lié à I_2 à extrêmement peu près par le rapport des nombres de spires. On observe que I'_1 est plus petit que I_1 , parfois très sensiblement, à cause du courant magnétisant et des pertes dans le fer.

Bien souvent, on ne tient pas compte de cette différence. C'est ainsi que les règles d'unifications proposées par la Chambre syndicale des constructeurs de gros matériel électrique indiquent : § 325. « Les pertes en charge dans les transformateurs statiques comprennent les pertes par effet Joule et les pertes supplémentaires. Ces pertes sont mesurées en appliquant à l'un des enroulements, à la fréquence de régime, une tension suffisante pour produire les courants normaux de régime dans les deux enroulements, l'autre enroulement étant fermé en court-circuit sur lui-même ». Par contre, une précision est introduite à propos de la tension de court-circuit, dans le § 606, d'accord avec le § 10 du fascicule 131 de l'Union des syndicats de l'électricité : « La tension de court-circuit d'un transformateur est celle qu'il est nécessaire d'appliquer aux bornes primaires pour obtenir la circulation du courant normal dans l'enroulement secondaire fermé sur lui-même ». On trouve des rédactions analogues dans les autres ouvrages.

Dans le diagramme ordinairement admis (fig. 1), I_0 est le courant à vide et l'on a

$$I_1^2 = I_2^2 + I_0^2 + 2I_0I_2 \cos \alpha$$

en ramenant les courants à même nombre de spires. L'essai en court-circuit donnerait $I_1 = I_2$.

La différence entre I_1 et I_2 est d'autant plus grande que $I_0 : I_1$ est plus fort. Même pour des appareils dans lesquels I_0 n'est qu'une fraction modérée du courant de pleine charge, le rapport $I_0 : I_1$

devient assez important aux charges réduites, et, bien souvent, on attache beaucoup d'importance aux propriétés des transformateurs à demi-charge, et même à quart de charge.

Le rapport du courant à vide au courant de pleine charge peut atteindre, d'après le § 814 de la publication ci-dessus citée du Syndicat du gros matériel :

20 pour 100 dans des appareils de 10 à 20 kVA.

15 pour 100 dans des appareils de 20 à 40 kVA.

10 pour 100 dans des appareils de 40 à 150 kVA.

8 pour 100 dans les appareils plus puissants.

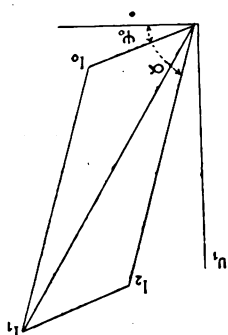


Fig. 1. — Courants primaire, secondaire et à vide d'un transformateur.

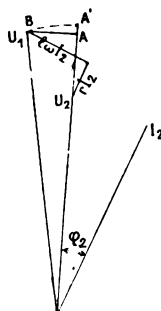


Fig. 2. — Méthode de Kapp.

Prenons un exemple : $\alpha = \frac{\pi}{4}$, $I_2 = 1$, $I_0 = 0,1$, nous obtenons $I_1 = 1,075$; c'est la pleine charge.

A quart de charge $I_2 = 0,25$ et $I_1 = 0,328$, avec un rapport de courants assez différent de 1, soit 1,31.

Une autre objection est que I_0 n'est pas sinusoïdal, surtout si α est important. Les transformateurs monophasés ont un courant magnétisant contenant des harmoniques 3 et 5 principalement; on ne peut donc porter les courants aussi simplement dans les diagrammes et formules si l'on veut être rigoureux. En pratique, on peut cependant le faire avec une approximation suffisante. On doit remarquer que, si les harmoniques d'ordre 3 persistent dans les montages diphasés ou triphasés en triangle, ils s'éliminent dans le triphasé en étoile; avec ce dernier montage les courants à vide ne s'éloignent pas beaucoup de la sinusoïde même dans les transformateurs relativement saturés.

3. — VARIATIONS DE LA TENSION SECONDAIRE.

Prenons l'essai en court-circuit comme on le pratique sans doute le plus souvent; en faisant passer dans le secondaire le courant correspondant à la charge considérée, sans s'occuper du courant primaire réel en charge, on détermine la résistance totale r et le coefficient total de dispersion l .

De là on tire les variations de la tension secondaire, à tension primaire et fréquence constantes, c'est-à-dire les variations du *rapport de transformation* $U_2 : U_1$, ou de la *chute de tension totale*, différence arithmétique des tensions efficaces U_1 et U_2 (ramenées au même circuit par le rapport des nombres de spires).

Cette chute de tension a pour valeur suffisamment approchée, le courant secondaire étant I_2 déphasé de φ_2 sur la tension secondaire U_2 :

$$(1) \quad [rI_2 \cos \varphi_2 + l\omega I_2 \sin \varphi_2] + \left[\frac{1}{2U_2} (l\omega I_2 \cos \varphi_2 - rI_2 \sin \varphi_2)^2 \right] \\ + [r_1 I_0 \sin \psi_0 + \lambda \omega I_0 \cos \psi_0].$$

Le premier crochet correspond (fig. 2) au remplacement de OA' par OA ; le second crochet est le premier terme du développement en série lorsqu'on ajoute AA' à OA , l'arc du cercle BA' n'étant plus confondu avec la perpendiculaire BA . Le troisième crochet (fig. 3) tient compte du courant à vide I_0 et d'un coefficient de dispersion λ relatif au primaire seul (1).

Rappelons, par exemple, que nous donnions dans un article paru dans l'*Industrie électrique* du 25 janvier 1926, des résultats d'essais effectués sur des transformateurs de 1 500 kVA, $f = 50$ p : s, ayant pour données caractéristiques :

$$\frac{rI_2}{U_2} = 0,012; \quad \frac{l\omega I_2}{U_2} = 0,10; \quad \frac{I_0}{I_2} = 0,08;$$

pertes actives à vide environ 1 pour 100.

Avec $\varphi_2 = 0$, la formule (1) amène à 2,1 pour 100, en accord avec la garantie du constructeur, en donnant à λ une valeur voisine de $\frac{l}{2}$. Le premier crochet seul donnerait 1,2 pour 100, les deux pre-

(1) Il peut sembler surprenant que les raisons d'être du second crochet de cette formule soient encore l'objet de discussions, alors qu'elles sont exposées depuis fort longtemps, par exemple dans *les Transformateurs*, P. Bunet (encyclopédie Blondel) page 42 et bien antérieurement dans l'*Encyclopédie Arnold et Lacour*, 2^e édition page 45.

miers seuls 1,7 pour 100. Ce sont des nombres entre eux comme 1 : 1,42 : 1,75 en prenant un, deux ou trois termes de la formule (1).

Remarquons en passant, que l'angle ψ_0 était autrefois, avec les tôles de fer ordinaire, vers 45° tandis que maintenant, avec les tôles au silicium, il s'abaisse souvent vers 10° d'où $\cos \psi_0 = 1$ et $\sin \psi_0 = 0,15$ (si l'on ne peut faire la détermination exacte). le terme en sinus devenant à peu près négligeable.

En ce qui concerne la valeur de λ , on décompose quelquefois l en deux parties relatives au primaire et au secondaire $l = l_1 + l_2$. On ne voit guère de raison pour effectuer cette décomposition et ne pas

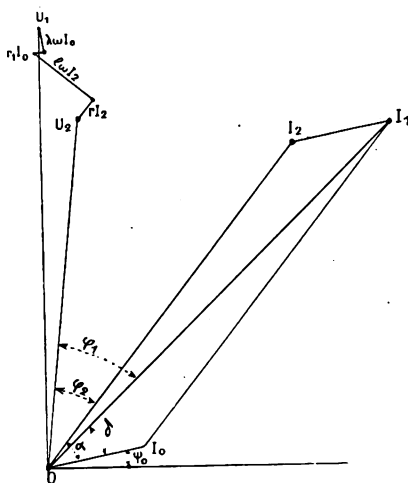


Figure 3. — Chute de tension en tenant compte du courant à vide.

garder l comme un coefficient global et insécable. Ceux qui admettent la décomposition sont amenés, par raison de symétrie et ne pouvant guère mieux faire, à faire $l_1 = l_2$. Ils ajoutent ainsi au primaire et au secondaire deux petites bobines fictives, hors du transformateur idéal, d'inductance $\frac{l}{2}$. A vide il faudra donc tenir compte

(1) Peut-être certains trouveront-ils ces transformateurs moins bons que ce que l'on pourrait obtenir? Nous nous félicitons cependant de les avoir choisis et commandés, parce que onze d'entre eux fonctionnent depuis dix ans sans le moindre incident alors que d'autres ayant de meilleures garanties, pour lesquels les diverses formules s'accordent mieux, placés dans leur voisinage, ne pourraient prétendre comme ceux-là qu'ils n'ont pas d'histoire. Des garanties peu serrées donnent assurément aux constructeurs de grandes facilités, mais, bien entendu, on ne saurait tirer des conclusions générales de telles comparaisons et remarques.

de ce que le courant I_0 traverse la bobine d'inductance λ et faire $\lambda = \frac{l}{2}$.

On calcule l au moyen de formules concordant assez bien avec les résultats de l'essai en court-circuit; on suppose les deux enroulements P et S (fig. 4) avec des forces magnétomotrices égales de la forme indiquée, les lignes de force étant disposées parallèlement entre elles comme la figure l'indique, ou peu incurvées. Ces lignes s'épanouissent dès qu'elles sortent des bobines, se fermant avec

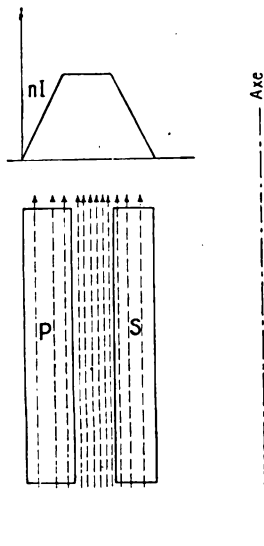


Fig. 4. — Dispersion avec courants égaux dans les deux enroulements.

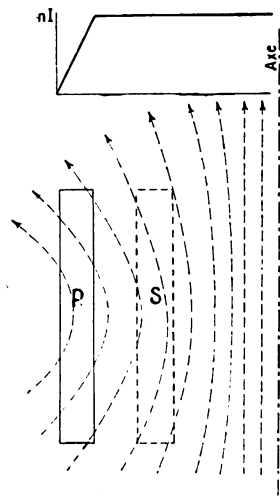


Fig. 5.

Dispersion avec courant dans un seul enroulement.

une réluctance externe à peu près nulle. (Ceci est pour des enroulements concentriques; on trouverait finalement de même dans les transformateurs à enroulements enchevêtrés ou cuirassés).

Si la bobine P, par exemple, est seule parcourue par le même courant, la bobine S étant ouverte, on pourra représenter la force magnétomotrice comme sur la figure 5. Si l'on supposait les lignes de force disposées comme celles de la figure 4, on trouverait pour λ la valeur l et même un peu plus ($\frac{1}{2}$ et non $\frac{1}{3}$ pour S).

Mais on ne peut plus admettre ces lignes de forces cantonnées à peu près parallèlement dans un espace annulaire étroit placé entre deux bobines de même force magnétomotrice. Elles sont incurvées,

d'autant plus fortement que la bobine est moins longue pour son diamètre, comme sur la figure 5, en ne devenant parallèles qu'assez loin de la face interne de la bobine P.

Le flux qui se produit en dehors des spires du secondaire S est ainsi sensiblement réduit surtout pour des bobines courtes et on tombe à $\lambda < l$, sans qu'on puisse admettre généralement $\lambda = \frac{l}{2}$. (On arriverait à de mêmes conclusions dans le cas de S seul traversé par du courant).

On introduit I_0 comme s'il était sinusoïdal alors qu'il se compose d'un terme fondamental qui n'est quelquefois que 0,8 et d'autant plus bas que I_0 est plus grand; cela amène à attacher un peu trop d'importance à $\lambda \propto I_0$. On arriverait ainsi à pouvoir justifier souvent λ vers $\frac{l}{2}$ en remarquant que l'on ne recherche qu'un terme correctif généralement peu important. S'il en est autrement, il vaut mieux regarder de plus près.

On trouve dans d'anciens ouvrages américains l'indication de prendre $\lambda = l$, en supposant des bobines très longues.

Certains peuvent se proposer, quoique cela n'offre souvent pas un bien grand intérêt, au lieu de calculer la chute de tension totale au moyen de la formule (1), de conserver l'emploi du diagramme de Kapp ou de son dérivé l'abaque de Blondel (voir une note de M. Blondel présentée à l'Académie des Sciences le 12 août 1929, sur un sujet analogue).

Il est facile, si on le désire, de transformer le diagramme de la figure 3 en celui de la figure 6. OI étant la médiane du triangle OI_1I_2 , nous avons approximativement

$$I = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad \psi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \quad \text{et} \quad r_1 = \frac{r}{2}.$$

Ayant déterminé par l'essai en court-circuit les valeurs de r et l , comme à l'ordinaire, la chute de tension sera :

$$\left[r I \cos \psi + l \omega I \sin \psi \right] + \left[\frac{1}{2U_2} (l \omega I \cos \psi - r I \sin \psi)^2 \right].$$

On appliquera la méthode de Kapp en portant au bout de U_2 , tension secondaire, dans le but d'obtenir U_1 , tension primaire, le triangle de court-circuit correspondant à la moyenne des courants primaire et secondaire, avec une phase correspondant à la moyenne des phases de ces deux courants par rapport à la tension secondaire.

Au lieu de considérer la chute de tension totale du transformateur, ou son rapport de transformation en charge, on ne considère souvent que la chute de tension que l'on peut appeler secondaire. c'est-à-dire la différence entre la tension à vide secondaire et la tension à la charge considérée. Afin d'éviter des confusions, on choisit souvent le terme de *régulation* pour caractériser cette quantité. Ainsi le fascicule 205 de la Chambre syndicale du gros matériel indique au § 406 : « Dans les transformateurs à tension constante, la régulation s'exprime par la chute relative de tension secondaire entre la marche à vide et une charge de grandeur et de phase spécifiées rapportée à

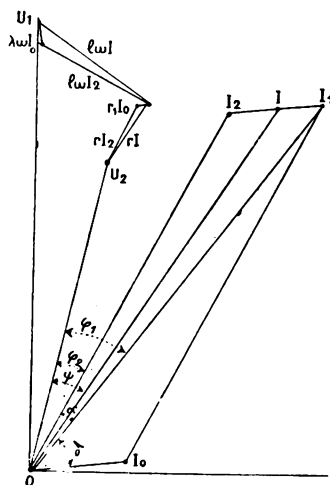


Fig. 6. — Chute de tension avec les courants et déphasages moyens.

la tension secondaire correspondant à la marche à vide, la tension primaire et la fréquence étant maintenues constantes à la valeur qui permet de réaliser le régime spécifié». Dans ce cas, comme il est bien indiqué au § 417, il ne faut pas tenir compte du troisième crochet de la formule (1).

Le fascicule 131 de l'*Union des Syndicats de l'Électricité* distingue, dans le § 8, l'élévation relative de tension rapportée à la tension en charge, et la chute relative de tension rapportée à la tension à vide, en ajoutant que l'une et l'autre de ces variations de tension sont appelées parfois auto-régulation.

Aux États-Unis, il est d'usage d'appeler régulation la différence des tensions secondaire à vide et en charge rapportée à la tension en charge. Ainsi, selon la formule adoptée pour définir la régulation,

on passe de 4 à 4,17 pour 100, de 6 à 6,38, etc. Si l'on doit introduire le terme de régulation dans des garanties formelles, il vaudrait mieux le bien définir.

Le courant à vide produit déjà une chute de tension totale quand le secondaire est ouvert, qui se conserve quelle que soit la charge (et diminue même un peu quand la charge augmente par suite de la réduction du flux dans les tôles).

La régulation, ou bien la variation de tension purement secondaire est souvent la donnée la plus importante à considérer si l'on s'en tient au fonctionnement de la plupart des appareils branchés sur le secondaire, comme les moteurs et les lampes.

Mais il faut tenir compte de la chute de tension totale lorsque l'on considère l'éventualité de marche en parallèle de transformateurs de construction ou de puissance différentes. La chute de tension à vide est parfois presque nulle; elle dépasse quelquefois un demi pour cent. Si l'on met en parallèle deux transformateurs ayant mêmes rapports de leurs nombres de spires, et que l'un d'eux ait un courant de magnétisation bien plus élevé que celui de l'autre, il en résulte une mauvaise répartition de la charge entre les deux appareils. Ainsi, avec une différence des tensions secondaires à vide de l'ordre de 0,5 pour 100 et une perte dans le cuivre, à pleine charge, de 1 pour 100, la différence des courants dans les deux transformateurs peut atteindre à toutes charges actives de 50 à 20 pour 100 du courant de pleine charge d'un appareil.

La chute de tension totale est à considérer lorsque le transformateur alimente des appareils de mesure qui peuvent se trouver faussés systématiquement d'un demi pour cent ou davantage (sans parler de la variation de phase).

Aussi nous semble-t-il qu'il vaudrait mieux éviter de spécifier que le rapport des tensions primaire et secondaire à vide et le rapport des nombres de spires primaire et secondaire sont deux formes équivalentes, notamment en ce qui concerne les garanties de marche en parallèle.

4. — DÉTERMINATION DES PERTES DANS LE CUIVRE ET PERTES ASSIMILÉES.

Appelons r_1 et r_2 les résistances primaire et secondaire, ramenées au même nombre de spires, valeurs par lesquelles il faut multiplier

les carrés de courants afin d'obtenir les pertes totales y compris celles dites parasites ou supplémentaires.

$$p = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2.$$

Dans l'essai en court-circuit on a déterminé r qui est égal à $r_1 + r_2$.

Si l'on estime, comme on le fait très souvent, la perte au moyen du courant secondaire, on admet

$$p'' = r I_2^2.$$

Si on l'estimait au moyen du courant primaire, on aurait :

$$p' = r I_1^2$$

et, en tenant compte de ce que $I_2^2 = I_1^2 + I_0^2 - 2 I_0 I_1 \cos \delta$,

$$p = p' + r_2 I_0^2 - 2 r_2 I_0 I_1 \cos \delta$$

$$p = p'' - r_1 I_0^2 + 2 r_1 I_0 I_1 \cos \delta$$

et finalement

$$p = \frac{p' + p''}{2} + \frac{p' - p''}{2} \frac{r_1 - r_2}{r}.$$

Très souvent les pertes relatives à chacun des enroulements sont égales ou à très peu près, de sorte qu'on est amené à prendre $r_1 - r_2$ pour nul ou négligeable; alors

$$p = \frac{p' + p''}{2}.$$

La perte réelle s'obtient alors en faisant la moyenne des carrés des intensités primaire et secondaire, et le multipliant par r tiré de l'essai en court-circuit.

Il en est encore de même, à très peu près, si r_1 et r_2 sont différents. Supposons $\frac{r_1}{r_2} = 1,5$ valeur peu souvent dépassée, nous avons $r_1 - r_2 = 0,2 r$.

En reprenant l'exemple donné dans notre § 1, où $I_2 = 1$; $I_1 = 1,075$, nous avons $\frac{p' + p''}{2} = 1,08 r$; $\frac{p' - p''}{2} = 0,08 r$ et $p = 1,096 r$, soit une différence de 1,5 pour 100.

Même à quart de charge, où le courant à vide a beaucoup plus d'importance $I_2 = 0,25$; $I_1 = 0,328$ d'où $\frac{p' + p''}{2} = 0,0832 r$; $\frac{p' - p''}{2} = 0,0207 r$ et $p = 0,0873 r$, soit une différence de 4,9 pour 100 seulement.

Si l'on prenait seulement p'' , comme on le fait souvent, l'erreur serait de 8 pour 100 à pleine charge et de 25 pour 100 à quart de charge.

Les pertes supplémentaires proportionnelles aux carrés des

courants ont lieu dans le cuivre même; ensuite dans d'autres parties traversées par les flux de fuites, comme les connexions bornes, boulons, cuves, et encore dans des portions du circuit magnétique, des tôles dans lesquelles entre un flux de dispersion surtout s'il est normal aux grandes faces.

On voit facilement que ces pertes sont à très peu près indépendantes du flux qui circule dans le noyau, elles ne dépendent que des courants. L'essai en court-circuit assimilé au fonctionnement normal est ainsi justifié. La seule différence provient de la modification apportée au courant primaire en charge par l'introduction du courant à vide, correction que l'on peut effectuer comme nous venons de le dire.

Quand nous écrivons $p = r_1 I_1^2 + r_2 I_1^2$, les coefficients r_1 et r_2 ne caractérisent pas seulement chacun des circuits, mais l'un et l'autre comprennent une part due à l'ensemble des deux. Si nous modifions l'enroulement 2, le coefficient r_1 s'en trouve quelque peu changé. On voit aussi que même pour $I_2 = 0$, il y a des pertes cependant dans l'enroulement 2 lorsque I_1 existe sous forme de courant à vide I_0 , si on appelle la perte $r_1 I_0^2$, r_1 est donc quelque peu fonction de la nature de l'enroulement 2.

On calcule ordinairement le coefficient de dispersion l sans tenir compte des courants parasites dans le cuivre; ce n'est exact que si les conducteurs sont suffisamment fins et les pertes parasites faibles. On se contente aussi de calculer les pertes dans le cuivre massif en prenant les inductions du flux de fuite dans ces conducteurs, en supposant des circuits fictifs dans le conducteur massif, déterminant des forces électromotrices, puis des courants parasites. Mais le flux de dispersion varie lui-même par réaction de ces courants.

Si r_c est la résistance totale, en courant continu, pour une perte réelle en courant alternatif, de forme

$$r I^2 = N r_c I^2 \text{ ou } r_c I^2 + (N - 1) r_c I^2,$$

on distingue souvent une perte dite normale, qu'on appelle Joule quelquefois, et une perte dite supplémentaire, chacune représentant le premier et le second des termes ci-dessus.

D'après le vocabulaire électrotechnique établi par le Comité électrotechnique français, fascicule n° 12, que l'on devrait toujours suivre, « l'effet Joule est l'échauffement qui se produit pendant le passage d'un courant électrique dans un conducteur ».

Il n'est pas spécifié que ce courant doit être continu. Les pertes supplémentaires peuvent ainsi être considérées, au moins pour la plus grande part généralement, comme faisant partie de l'effet Joule, de forme rI^2 , où r est la résistance effective.

Le terme « ohmique » devrait disparaître. On dit la chute ohmique, la résistance ohmique, certains parlant de la résistance en courant continu, d'autres de la résistance effective totale en courant alternatif, mesurée par l'essai en court-circuit dans un transformateur (§ 417 de la publication de la Chambre syndicale du gros matériel). La réactance ne serait pas ohmique, cependant elle a l'ohm pour unité.

Des appellations établies avec plus de rigueur seraient désirables si l'on veut éviter des confusions.

5. — VARIATION DES PERTES DANS LE CUIVRE AVEC LA TEMPÉRATURE.

Il arrive parfois qu'il est impossible d'effectuer l'essai de court-circuit à la température exacte pour laquelle la garantie est donnée. On doit alors affecter d'une correction le résultat obtenu. Comment effectuer cette correction? En prenant trop à la lettre les règles de la Chambre syndicale du gros matériel, soit § 305: « On déterminera les pertes de la machine en état de régime, c'est-à-dire en particulier à la température normale de fonctionnement; les valeurs des résistances seront donc ramenées, conformément aux indications des règles françaises d'unification aux valeurs qu'elles auraient à la température de 75°, quelle que soit la température à laquelle sont faits les essais » et § 417 « P = Puissance en watts mesurée par l'essai de court-circuit et corrigée à 75° », certains sont tentés de multiplier la puissance perdue mesurée à t° , pour l'obtenir à T° par $\frac{234,5 + T}{234,5 + t}$. L'expérience montre l'inexactitude de cette manière de faire.

Des publications étrangères n'admettent cette correction, ainsi effectuée, que pour r_c , résistance mesurée en courant continu; la résistance supplémentaire r_s , telle que la résistance effective $r = r_c + r_s$, avec la perte de forme rI^2 , diminuerait quand la température augmente, passant de la valeur pour t° à la valeur pour T° selon la loi

$$\frac{234,5 + t}{234,5 + T} \quad (2)$$

Ainsi, r_c étant 0,75 de r mesuré en court-circuit, la perte, pour une température passant de 20° à 80° ne serait pas multipliée par $\frac{314,5}{254,5} = 1,24$, mais par $0,75 \frac{314,5}{254,5} + 0,25 \frac{254,5}{314,5} = 1,13$ seulement.

Théoriquement cette manière de faire n'est pas exacte. Mais nous allons voir que, pour les bons transformateurs fonctionnant à la fréquence 50, elle s'approche suffisamment de la réalité pour qu'on l'adopte.

Si l'on suppose qu'un certain flux coupe des conducteurs assez épais, nous pouvons découper des spires sièges de forces électromotrices proportionnelles au flux inducteur. Les courants résultants décroîtront si la résistivité des conducteurs augmente par accroissement de la température.

Il y a de telles pertes dans d'autres parties que le cuivre, dans le fer notamment et alors le coefficient de température est plus élevé (vers 0,0055 eu lieu de 0,004). Ces pertes diminuent donc davantage avec la température que ne l'indique la formule (2). Cependant le contraire a lieu pour des tôles au silicium.

De telles pertes supplémentaires peuvent être appelées pertes en dérivation : un flux supposé fixe, en valeur efficace, agit sur des circuits donnés ; mais il peut se faire qu'on ne doive pas considérer le flux comme fixe. Par exemple, supposons que nous disposions autour d'un flux de fuite, de grandeur non imposée, un circuit de faible résistance embrassant tout ce flux, soit un amortisseur. A la limite, jamais atteinte, il y aurait dans ce circuit création d'une force magnétomotrice égale à celle qui donnerait naissance au dit flux de fuite, et ce dernier serait alors amorti ; la dissipation de chaleur dans le circuit amortisseur parcouru par un courant à peu près indépendant de sa résistance, serait proportionnel à cette résistance même, et croîtrait donc avec la température ; on peut appeler cela des pertes en série.

Quelques tentatives ont été faites autrefois dans cette direction, avec l'espoir de détruire la dispersion des transformateurs et la chute de tension corrélative en disposant des circuits fermés peu résistants, embrassant le flux de fuite ; elles ont été abandonnées pour diverses raisons, notamment à cause de l'augmentation sensible de pertes ainsi apportée. On peut admettre aussi que certains circuits parasites ont une dissipation en chaleur suivant plus ou moins cette loi, comme les pertes dans les masses métalliques entou-

rant des barres de connexions. Leur existence conduit à envisager des pertes supplémentaires totales diminuant moins avec la température que ne l'indique la formule (2).

Ainsi, il se produit, en dehors de l'enroulement même, d'autres pertes supplémentaires dont les unes croissent et les autres décroissent quand la température augmente. Comme généralement elles sont relativement moins importantes, on peut s'en tenir dans la recherche d'une loi générale de variation à ce qui se passe pour l'enroulement.

La formule (2) suppose implicitement qu'il n'y a aucune réaction des courants parasites induits sur le flux de dispersion. Cette réaction existe cependant et devient importante quand les courants parasites sont grands, ou bien quand la résistance effective en courant alternatif est notablement plus élevée que la résistance en courant continu. Allons tout de suite loin dans cette voie en supposant une bande de longueur totale L , de largeur e , d'épaisseur h , roulée de champ en forme de solénoïde à une couche, donc d'épaisseur radiale e , le conducteur étant de dimension h parallèlement à l'axe. En courant continu, la résistance à la température initiale est

$$R_{co} = \rho_0 \frac{L}{eh}.$$

La largeur e se trouve, supposons-le, sensiblement plus grande que la valeur ε de la peau Kelvin; nous savons alors qu'en courant alternatif

$$R_0 = \varepsilon_0 \frac{L}{h}.$$

La résistance supplémentaire est

$$R_0 - R_{co} = \rho_0 \frac{L}{h} \left(\frac{1}{\varepsilon_0} - \frac{1}{e} \right).$$

A la température qui est au-dessus de la température initiale de t° , la résistance effective est R_t alors qu'elle serait R_{ct} en courant continu, et

$$R_t - R_{ct} = \rho_t \frac{L}{h} \left(\frac{1}{\varepsilon_t} - \frac{1}{e} \right)$$

devient la résistance supplémentaire.

Elle s'est donc accrue entre la température initiale et la température de t° plus élevée, de

$$\frac{L}{h} \left(\rho_t \left(\frac{1}{\varepsilon_t} - \frac{1}{e} \right) - \rho_0 \left(\frac{1}{\varepsilon_0} - \frac{1}{e} \right) \right).$$

On a : $\varepsilon_0 = 5\,030 \sqrt{\frac{\rho_0}{f}}$ cm. (résistance en ohms)

$$\varepsilon_t = 5\,030 \sqrt{\frac{\rho_t}{f}} = \varepsilon_0 \sqrt{1 + \alpha t} = 5\,030 \sqrt{\frac{\rho_0}{f}} \sqrt{1 + \alpha t}$$

où α est le coefficient de température de la résistance. En posant $\sqrt{1 + \alpha t} = 1 + \frac{\alpha t}{2}$, on trouve pour l'accroissement de pertes supplémentaires avec l'augmentation t de température :

$$\frac{L}{h} \rho_0 \alpha t \left[\frac{1}{2\varepsilon_t} - \frac{1}{e} \right].$$

Cet accroissement devient positif dès que e dépasse $2\varepsilon_t$ (ou seulement à peu près $2\varepsilon_t$, car notre formule n'est rigoureusement applicable que pour e considérablement au-dessus de ε).

Exemple. — Le ruban de cuivre a plus de 3 cm radialement; $\rho = 1,62 \cdot 10^{-6}$; $f = 50$. ε_t est alors voisin de 1 cm; le crochet devient

$$0,5 - (< 0,33).$$

Les pertes supplémentaires croissent nettement avec la température et la formule (2) est là tout à fait fausse.

Lorsque e devient très grand, l'augmentation de pertes supplémentaires est $\frac{L}{h} \rho_0 \frac{\alpha t}{2} \frac{1}{\varepsilon_t}$ pour une variation de t degrés. Le rapport des

pertes supplémentaires est $\frac{\rho_t}{\varepsilon_t} : \frac{\rho_0}{\varepsilon_0} = \sqrt{1 + \alpha t}$.

En prenant la question sous une forme encore plus numérique, supposons un conducteur de cuivre de 4 cm radialement; à la température initiale on a $\varepsilon = 1$ cm, de sorte que la résistance totale est quatre fois la résistance en courant continu.

Les pertes supplémentaires sont alors trois fois celles qui correspondent à la résistance en courant continu mesurée à cette température initiale.

Augmentons la température de 50° environ, $\alpha t = 0,2$; alors $\varepsilon = 1,1$ cm et le cuivre est un peu mieux utilisé.

La résistance totale est $\frac{4}{1,1}$ fois la résistance en courant continu à chaud; les pertes supplémentaires à chaud sont donc égales à $\left(\frac{4}{1,1} - 1\right)$ fois celles correspondant à la résistance en courant continu à chaud où 2,636, mais $2,636 \times 1,2 = 3,16$ fois celles qui correspondent à la résistance en courant continu mesurée à la température initiale. Elles ont donc augmenté de 5,3 pour 100 et non pas diminué de 20 pour 100 selon la formule (2).

On sait qu'on ne donnera pas une largeur radiale de 3, de 4 cm ou davantage aux conducteurs d'enroulements concentriques (ou dimension perpendiculaire d'enroulements enchevêtrés), tout au plus dépasse-t-on un centimètre à la fréquence 50 en d'assez rares exceptions. Mais à une fréquence plus élevée, 1 800 p. : s par exemple, ϵ est six fois plus petit, vers 0,16 cm, et l'épaisseur radiale e dépasse plusieurs fois ϵ dans beaucoup de cas, par exemple sur les fours à induction avec enroulement refroidi par circulation d'eau.

6. — FORMULES POUR OBTENIR LA PERTE SUPPLÉMENTAIRE DANS LES ENROULEMENTS.

Pour obtenir la résistance réelle ou effective en courant alternatif, il suffit d'opérer comme on le fait dans le cas des barres droites, en partant des équations de Maxwell reliant l'induction et la densité du courant en chaque point. La solution est cependant plus difficile, et on ne peut y arriver que moyennant certaines approximations.

Nous nous servirons des résultats obtenus par Sommerfeld (voir *Annalen der Physik*, 1904. Über das Wechselfeld und Wechselstromwiderstand von Spulen und Rollen), en les adaptant plus spécialement au cas qui nous occupe.

Appelons e l'épaisseur radiale de section rectangulaire constituant un enroulement de m couches, de grande longueur; désignons par ϵ l'épaisseur de peau Kelvin obtenue au moyen de la formule

$$\epsilon = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ (unités E.M. pratiques)}$$

ρ résistivité en ohms-cm; f fréquence.

Mais ϵ ne sera ici, en général, qu'un simple facteur de référence sans que nous puissions prétendre que la résistance effective est

celle qui correspondrait à une couche utile d'épaisseur ε ou à toute autre couche d'épaisseur liée à ε .

Posons $\beta = 2 \frac{e}{\varepsilon}$. Si nous avons du fil rond, il nous suffirait de remplacer dans cette formule e par le rayon du fil multiplié par $\sqrt{\pi}$ ou 1,77.

Formons les deux fonctions de β .

$$\varphi(\beta) = \frac{\beta}{2} \frac{\operatorname{sh} \beta + \sin \beta}{\operatorname{ch} \beta - \cos \beta}$$

$$\psi(\beta) = \beta \frac{\operatorname{sh} \frac{\beta}{2} \cos \frac{\beta}{2} + \sin \frac{\beta}{2} \operatorname{ch} \frac{\beta}{2}}{\operatorname{ch} \beta - \cos \beta}.$$

La résistance effective en courant continu étant R_c , celle en courant alternatif sera R (résistance réelle ou effective).

$$R = R_c \left[\frac{\varphi(\beta) + \psi(\beta)}{2} + M \frac{\varphi(\beta) - \psi(\beta)}{2} \right] \quad (3)$$

Lorsque le nombre des couches m est assez grand, soit en pratique $m \geq 3$, on a $M = \frac{4}{3} m^2$.

Pour une seule couche ou $m = 1$, on prendra $M = 1$.

Pour deux couches, ou $m = 2$, on pourra prendre $M = 4,8$.

Dans le cas d'une seule couche, la formule se réduit à

$$R = R_c \varphi(\beta).$$

Lorsque β est assez petit, soit pour $e \leq \varepsilon$, et même un peu au delà, on a

$$R = R_c \left(1 + \frac{2}{3} \frac{\beta^4}{5!} \right) = R_c \left(1 + \frac{\beta^4}{180} \right) \text{ pour une couche}$$

$$R = R_c \left(1 + \frac{1 + 15M}{24} \frac{\beta^4}{5!} \right) = R_c \left(1 + \frac{1 + 15M}{2880} \beta^4 \right) \quad (4)$$

pour plusieurs couches.

Au contraire, lorsque β est grand, c'est-à-dire e plusieurs fois ε , on obtient

$$R = R_c \frac{\beta}{2} = R_c \frac{e}{\varepsilon},$$

pour une couche, c'est une formule que nous connaissons déjà, et, pour plusieurs couches

$$R = R_c \frac{\beta}{4} (1 + M) = R_c \frac{e}{\varepsilon} \frac{1 + M}{2}. \quad (5)$$

Les formules de Sommerfeld ont été établies pour de longs solénoïdes. Elles ne sont qu'approximatives, en effet, la longueur de ces solénoïdes n'y figure pas, et les rapports de cette longueur au diamètre et à l'épaisseur d'enroulement déterminent une incurvation des lignes de force traversant les conducteurs qui est fonction de ces rapports. Les formules contiennent donc certaines hypothèses simplificatrices et ne sont que des approximations. Dans les vérifications qui furent faites par l'auteur, en mesurant directement la chaleur dégagée dans un calorimètre, on arriva à des résultats plus faibles pour la résistance supplémentaire en courant alternatif.

Cela amena à l'introduction d'un coefficient k dont on doit affecter

$$\frac{R}{R_c} \frac{R_c}{R_c}.$$

On a trouvé $k = 0,6$ dans le cas d'un solénoïde à une couche et $k = 0,75$ dans celui de nombreuses couches, mais ces corrections assez élevées s'appliquent à des bobines de bien plus petites dimensions que celles des transformateurs et les essais furent généralement faits à des fréquences élevées.

D'autre part, le cas d'un solénoïde n'est pas tout à fait le cas d'un transformateur où le courant à vide circulant dans un enroulement cause des pertes dans l'autre. La présence du noyau de fer modifie aussi plus ou moins la direction du champ dans l'air.

En faisant le calcul selon les formules de Sommerfeld, pour chacun des enroulements comme s'il était seul et parcouru par son courant propre on trouve peut être ainsi des pertes un peu faibles, d'autant plus qu'il y a souvent des pertes appréciables en dehors du cuivre même. Pour tenir compte de tout cela sans recourir à des formules compliquées, nous adopterons simplement les formules de Sommerfeld, mais sans introduire les coefficients k , c'est-à-dire $k = 1$.

Ceci ne s'applique que si les lignes de force sont, pour le plus grand nombre, toujours normales au sens de l'épaisseur e , c'est-à-dire que la disposition générale est selon la figure 4. S'il en était autrement, il faudrait regarder de plus près.

Valeurs numériques. — Dans les appareils de fréquence 50, on a toujours, ou à peu près, $e \leq \epsilon$, puisque, pour le cuivre

à 0°	$\rho = 1,6 \cdot 10^{-6}$	et	$\epsilon = 0,90$ cm.
vers 25°	$\rho = 1,75 \cdot 10^{-6}$	et	$\epsilon = 0,94$ cm.
vers 65°	$\rho = 2 \cdot 10^{-6}$	et	$\epsilon = 1,01$ cm.

On atteint rarement 15 mm pour l'épaisseur radiale des conducteurs d'enroulements concentriques (et la dimension normale dans les enroulements enchevêtrés). Pratiquement, pour la fréquence 50, les très simples formules approchées, cas de β petit, suffiront. Pour des dimensions de conducteurs plus grandes et des fréquences plus élevées, il faut employer les formules complètes donnant $\varphi(\beta)$ et $\psi(\beta)$.

Le tableau ci-après permettra d'opérer plus rapidement.

$2 \frac{e}{t} = \beta$	$\varphi(\beta)$	$\psi(\beta)$	$\frac{1}{2} (\varphi(\beta) + \psi(\beta))$	$\frac{1}{2} (\varphi(\beta) - \psi(\beta))$
0,45	1,000	0,997	0,999	0,0015
1,0	1,005	0,993	0,999	0,0061
1,5	1,027	0,977	1,002	0,0252
1,93	1,075	0,935	1,005	0,0697
2	1,085	0,925	1,005	0,0800
2,12	1,107	0,906	1,006	0,100
3	1,378	0,677	1,028	0,350
4	1,898	0,272	1,085	0,813
4,55	2,220	0,0604	1,140	1,080
5	2,477	— 0,0795	1,199	1,278
5,5	2,746	— 0,207	1,270	1,476

A la fréquence 50 p : s, pour du cuivre à la température de 65°, on a $\varepsilon = 1$ cm et, si l'épaisseur du conducteur ne dépasse guère 1 cm, on obtient

$$R = R_c \left(1 + \frac{1 + 15M}{180} \varepsilon^2 \right). \quad (6)$$

Exemples : 1° Un transformateur a un premier enroulement en fils de 1 mm de diamètre et 40 couches de fils (épaisseur relativement grande), l'autre enroulement est concentrique en fils de 4 mm de diamètre et 10 couches, $f = 50$, $\varepsilon = 1$ cm.

Premier enroulement :

$$e = 0,05 \sqrt{\pi}; \quad 15M = 32\,000; \quad R = 1,011 R_c.$$

Deuxième enroulement :

$$e = 0,2 \sqrt{\pi}; \quad 15M = 2\,000; \quad R = 1,174 R_c.$$

S'il y a à peu près mêmes pertes dans le cuivre pour les deux enroulements, la résistance effective totale du transformateur sera la moyenne de ces valeurs soit 1,09 fois la valeur en courant continu. L'expérience donne bien une majoration de l'ordre de 10 pour 100 pour un tel appareil.

Mais si l'on gardait ces dimensions pour un transformateur destiné à la fabrication de l'ozone, utilisé à une fréquence de 500 p : s, nous aurions, en revenant aux formules (4).

Premier enroulement :

$$\beta = 2 \frac{0,05 \sqrt{\pi}}{1 : \sqrt{10}} \quad \text{et} \quad \beta' = 0,1;$$

$$R = 2,1 R_c.$$

Deuxième enroulement :

$$\beta = 2 \frac{0,2 \sqrt{\pi}}{1 : \sqrt{10}} \quad \text{et} \quad \beta' = 25;$$

$$R = 18 R_c.$$

Les pertes seraient alors inadmissibles.

2° Un transformateur de 10 000 kva est composé de deux circuits concentriques. Le premier a 17 couches de ruban de 2,3 mm ; pour celui-ci, à la fréquence 50 p : s, et 65° on a 15 M = 5780 et $R = 1,09 R_c$.

Le second circuit, composé de deux couches de ruban de 1,1 cm dans le sens radial. on a 15 M = 72 et $R = 1,60 R_c$.

Au lieu de calculer au moyen de la formule (6) nous pouvons appliquer la formule (3) puisque ϵ est un peu au-dessus de ϵ , alors on a plus exactement :

$$\begin{array}{l|l} \varphi(\beta) = 1,144 & \frac{\varphi(\beta) + \psi(\beta)}{2} = 1,010 \\ \psi(\beta) = 0,875 & \frac{\varphi(\beta) - \psi(\beta)}{2} = 0,134 \end{array}$$

d'où :

$$R = 1,65 R_c.$$

Les pertes déterminées en mesurant la résistance en courant continu sont respectivement, pour le régime de pleine charge, de 40 et 33 kilowatts, soit 73 au total.

En appliquant les coefficients ci-dessus on passe à 43,6 et 54,4 kilowatts, soit 98 au total. L'expérience a donné 104 kw.

Donc, la résistance totale calculée est 1,345 fois la résistance en courant continu, tandis que l'expérience donne 1,42.

L'accord est assez satisfaisant, d'autant plus que les pertes dans les boulons, les tôles, les connexions, la cuve et son couvercle sont accrues par une dispersion élevée. Il faut noter d'autre part que les deux couches du second enroulement sont séparées par un anneau vide radial de plus de 1 cm, et que cela réduit peut-être un peu les pertes.

7. — VARIATION DES PERTES SUPPLÉMENTAIRES AVEC LA TEMPÉRATURE.

1° Lorsque e ne dépasse guère ε , c'est-à-dire lorsque β est petit, la résistance effective est donnée par la formule (4) de la forme

$$R = R_c (1 + a\beta^4) = R_c \left(1 + \frac{b}{\varepsilon^4}\right).$$

b est indépendant de la température, de sorte qu'à la température initiale et à une autre température plus élevée de t° , nous aurons pour résistances supplémentaires,

$$R_{co} \frac{b}{\varepsilon_0^4} \quad \text{et} \quad R_{ct} \frac{b}{\varepsilon_t^4}.$$

Comme $R_{ct} = R_{co} (1 + \alpha t)$ et $\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_t} = \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha t}}$, il en résulte que la *résistance supplémentaire à chaud est divisée par $(1 + \alpha t)$* . C'est la formule (2). Ou bien, en écrivant la résistance supplémentaire

$$R_s = R_c a \beta^4,$$

$$\text{on a :} \quad \frac{dR_s}{dt} = a \beta^4 \frac{dR_c}{dt} + 4 R_c a \beta^3 \frac{d\beta}{dt},$$

$$\frac{dR_c}{dt} = R_c \alpha, \quad \frac{d\beta}{dt} = -\beta \frac{\alpha}{2}$$

$$\text{et} \quad \frac{dR_s}{dt} = -R_s \alpha.$$

2° Lorsque β est grand, c'est-à-dire que e est égal à un assez grand nombre de fois ε , les résistances supplémentaires aux deux températures différant de t° sont, d'après la formule (5'), de la forme

$$R_{co} \left(\frac{c}{\varepsilon_0} - 1 \right),$$

$$R_{ct} \left(\frac{c}{\varepsilon_t} - 1 \right).$$

Il en résulte, que dès que $\frac{e}{\varepsilon}$ est suffisamment grand, la résistance supplémentaire à chaud est multipliée par $\sqrt{1 + \alpha t}$. C'est ce que nous avons déjà établi dans le § 5 pour le cas d'une seule couche. Ou bien, en écrivant la résistance supplémentaire $R_s = R_c \left(\frac{c}{\varepsilon} - 1 \right)$, soit pour $\frac{c}{\varepsilon}$ ou $\frac{e}{\varepsilon}$ grand $R_s = R_c \frac{c}{\varepsilon}$, puis en dérivant :

$$\frac{dR_s}{dt} = \frac{c}{\varepsilon} \frac{dR_c}{dt} + R_c \frac{d\frac{1}{\varepsilon}}{dt} = \frac{c}{\varepsilon} R_c \alpha - c R_c \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\alpha}{2} = + R_c \frac{\alpha}{2}.$$

3° Dans le cas général, la formule (3) est de la forme

$$R = R_c N.$$

A la température initiale, et à la température plus élevée de t , nous avons

$$\begin{aligned} R_0 &= R_{co} N_0, \\ R_t &= R_{ct} N_t. \end{aligned}$$

D'où le rapport des résistances supplémentaires

$$\frac{R_t - R_{ct}}{R_0 - R_{co}} = (1 + \alpha t) \frac{N_t - 1}{N_0 - 1}.$$

Nous avons vu que pour β petit, soit $e \leq \epsilon$, le rapport devient $\frac{1}{1 + \alpha t}$, c'est-à-dire que $\frac{N_t - 1}{N_0 - 1} = \frac{1}{(1 + \alpha t)^2}$, et les pertes supplémentaires décroissent quand la température s'élève.

Puis lorsque β croît, cette diminution des pertes supplémentaires avec la température s'atténue, et pour β assez grand, les pertes supplémentaires augmentent avec la température, le rapport $\frac{N_t - 1}{N_0 - 1}$ tend vers la limite $\frac{1}{\sqrt{1 + \alpha t}}$, et le rapport $\frac{R_t - R_{ct}}{R_0 - R_{co}}$ tend vers la limite $\sqrt{1 + \alpha t}$.

Il existe donc une valeur de β telles que les pertes supplémentaires ne varient pas avec la température. Nous avons déjà vu dans le § 5 que c'est pour e vers 2ϵ dans le cas d'une seule couche; on peut établir qu'il en est approximativement ainsi quel que soit le nombre de couches pour une valeur de e égale à environ $2,3 \epsilon$. Cela correspond à 23 mm environ pour un conducteur de cuivre et $f=50$.

Voici quelques exemples numériques.

1^{er} Exemple. — Epaisseur radiale du conducteur rectangulaire $e = 1$ cm. Fréquence 50 p : s.

A la température de 25°, $\epsilon = 0,94$ cm; $\beta = 2,12$.

A la température de 75°, $\epsilon = 1,034$ cm; $\beta = 1,93$ et $(1 + \alpha t) = 1,21$ $(1 + \alpha t)^2 = 1,46$.

NOMBRE DE COUCHES	$N_{25} - 1$	$N_{75} - 1$	$\frac{N_{25} - 1}{N_{75} - 1}$	$(1 + \alpha t) \frac{N_{25} - 1}{N_{75} - 1}$
1	0,407	0,075	1,43	1 : 1,18
2	0,486	0,340	1,43	1 : 1,18
3	1,208	0,840	1,44	1 : 1,19
4	2,14	1,49	1,44	1 : 1,19
5	3,34	2,33	1,44	1 : 1,19
8	8,54	5,95	1,44	1 : 1,19
10	13,34	9,30	1,44	1 : 1,19

L'avant-dernière colonne vérifie à très peu près $\frac{N_t - 1}{N_0 - 1} = \frac{1}{(1 + \alpha t)^2}$.

La dernière colonne montre que les pertes décroissent, avec $1 + \alpha t$ à leur dénominateur; dans ce cas $e = \varepsilon$ environ. La loi, exacte avec $\beta = 2 \frac{e}{\varepsilon}$ petit, se conserve ainsi jusque là, même pour des épaisseurs totales d'enroulement inusitées, soit 10 cm. de cuivre et alors des pertes supplémentaires égales à plus de 10 fois les pertes évaluées au moyen de R_c mesuré en courant continu.

2° *Exemple.* — Epaisseur radiale du conducteur rectangulaire $e = 2,35$ cm. Fréquence 50 p : s.

A la température de 25°, $\varepsilon = 0,94$ cm; $\beta = 4,55$.

A la température de 75°, $\varepsilon = 1,034$ cm, $\beta = 5$; $1 + \alpha t = 1,21$.

NOMBRE DE COUCHES	$N_{25} - 1$	$N_{75} - 1$	$\frac{N_{25} - 1}{N_{75} - 1}$	$(1 + \alpha t) \frac{N_{75} - 1}{N_{25} - 1}$
1	1,48	1,22	1,21	1,00
2	6,43	5,32	1,20	1,01
3	15,53	13,11	1,19	1,02
4	27,46	23,17	1,18	1,02
5	42,80	36,14	1,18	1,03

La dernière colonne montre que les pertes supplémentaires ne changent presque pas avec la température, et ne changeraient pratiquement plus du tout pour e légèrement inférieur à 2,35 cm.

Remarquons que les pertes supplémentaires seraient trop importantes pour un enroulement de plus d'une couche.

3° Epaisseur radiale du conducteur rectangulaire 2,58 cm. Fréquence 50 p : s.

A la température de 25°, $\varepsilon = 0,94$ cm; $\beta = 5$.

A la température de 75°, $\varepsilon = 1,034$ cm; $\beta = 5,5$, $1 + \alpha t = 1,21$.

NOMBRE DE COUCHES	$N_{25} - 1$	$N_{75} - 1$	$\frac{N_{25} - 1}{N_{75} - 1}$	$(1 + \alpha t) \frac{N_{75} - 1}{N_{25} - 1}$
1	1,75	1,48	1,18	1,02
2	7,36	6,43	1,15	1,05
3	17,88	15,53	1,15	1,05
4	31,57	27,46	1,15	1,05
5	49,19	42,80	1,15	1,05

La dernière colonne montre que les pertes supplémentaires commencent nettement à croître lorsque la température augmente.

Remarque. — Les trois tableaux ci-dessus ne changeraient pas pour des épaisseurs de conducteurs égales à 1,67 mm, à 3,92 mm, à 4,3 mm, la fréquence étant 1800 p : s, ou bien seulement égales à 1 mm, à 2,35 mm, à 2,58 mm, la fréquence devenant 5000 p : s.

8. — VARIATIONS DES PERTES SUPPLÉMENTAIRES TOTALES D'UN TRANSFORMATEUR AVEC LA TEMPÉRATURE.

Dans le plus grand nombre de cas, à la fréquence 50, les pertes supplémentaires relatives à chacun des enroulements restent assez faibles, pour que l'un et l'autre, donc leur somme aussi, décroissent quand la température augmente selon la division par $1 + \alpha t$.

Si l'un des enroulements seul devient assez épais, il se peut qu'il diminue moins, ou ne diminue plus, augmente même un peu. Alors la correction de l'ensemble, pour amener à une température donnée, doit se faire en corrigeant séparément chacun des enroulements.

Quand l'on fait cette correction de température, il est bon de calculer comme nous l'avons indiqué ci-dessus les pertes à la température pour laquelle on fait la mesure. Si l'on trouve beaucoup plus par l'expérience, c'est souvent dans le cas d'une dissymétrie qui fait que les lignes de force de dispersion entre les enroulements, et dans ceux-ci, au lieu de rester parallèles ou à peu près, coupent plus ou moins obliquement des conducteurs sur une face assez large, déterminant ainsi un excès de pertes supplémentaires qui peut croître ou décroître avec la température, décroissant toujours d'autant moins qu'il est plus important.

Discussion

Lors de la présentation de ce rapport à la séance du 15 janvier de la 1^{re} Section, M. DE PISTOYE a présenté les observations suivantes :

Au sujet de l'application des méthodes qui viennent d'être exposées au calcul des pertes supplémentaires, M. DE PISTOYE attire l'attention sur le cas particulier des transformateurs construits pour obtenir une variation du rapport de transformation et dont les enroulements peuvent par conséquent se trouver déséquilibrés comme hauteur. Dans le cas où l'on utilise des conducteurs en cuivre de faible épaisseur en-

roulés à plat, on peut trouver des pertes supplémentaires peu élevées, en appliquant les formules précédemment indiquées, alors qu'en réalité, du fait que les parties du bobinage placées aux extrémités des enroulements, sont coupées obliquement par les lignes de force, ces pertes peuvent être considérablement augmentées.

Par ailleurs, M. de Pistoye fait observer qu'on est parfois conduit dans le cas d'enroulements concentriques, pour éviter la déformation du bobinage intérieur en cas de court-circuit (fig. 7) à adopter des conducteurs d'épaisseur déjà élevée et telle que l'épaisseur fictive ϵ admise dans les calculs de M. Bunet soit dépassée. Dans ces conditions, les pertes supplémentaires dans le cuivre, qui diminuent avec la température dans le cas de conducteurs minces, doivent au contraire aug-

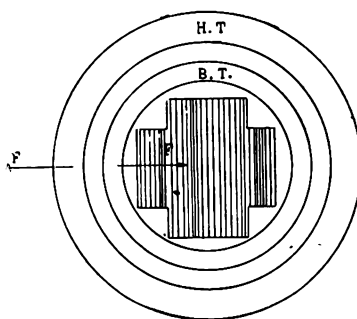


Figure 7.

menter. Bien que M. Bunet ait signalé ce cas particulier, il ne lui paraît pas inutile d'attirer à nouveau l'attention à ce sujet. M. de Pistoye montre qu'il est possible de prévoir par des considérations physiques simples, les résultats énoncés par M. Bunet. Les courants qui entraînent des pertes supplémentaires dans les conducteurs sont des courants tourbillonnaires : si l'on considère un courant élémentaire, son intensité est égale au quotient de la tension induite par variation de flux à travers la surface qu'il embrasse par une impédance de la forme :

$$\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$$

Si l'épaisseur du conducteur est faible, la surface précédente est très aplatie et par conséquent $L\omega$ est négligeable devant R .

Dans ces conditions, le courant varie en raison inverse de la résistance. Comme cette résistance augmente avec la température, les pertes

supplémentaires doivent donc décroître quand la température augmente.

Au contraire, dans le cas de conducteurs épais, les courants élémentaires tendent à embrasser la plus grande surface possible, la réactance correspondante est grande, vis-à-vis de la résistance, les intensités des courants tourbillonnaires sont alors sensiblement constantes et par conséquent, les pertes supplémentaires varient proportionnellement à la résistance du cuivre. Elles augmentent donc avec la température.

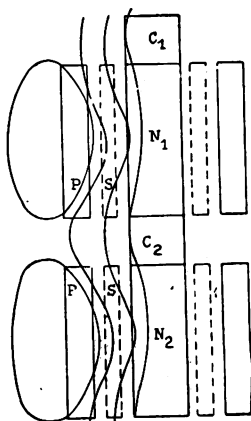


Figure 8.

M. DARRIEUS pense que l'expression simple du coefficient

$$\lambda : \frac{1}{3} e_1 + d + \frac{1}{2} e_2$$

pour le cas du secondaire à l'intérieur et à peu près zéro pour le cas du secondaire à l'extérieur, ne doit pas être éloignée de la vérité tandis que le choix de $\frac{l}{2}$ est tout à fait arbitraire.

La 1^{re} expression, qui néglige l'influence des bouts et de la réluctance des culasses est de ce fait un peu plus éloignée de la vérité que celle analogue,

$$\frac{1}{3} e_1 + d + \frac{1}{3} e_2$$

de la réactance totale car elle admet que la réluctance du circuit magnétique est concentrée au droit de la f. m. m. correspondante (fig. 8).

En ce qui concerne la formule de Sommerfeld, son expression de la 1^{re} approximation

$$1 + a \beta^4$$

avec

$$\beta = 2 \frac{e}{\varepsilon}$$

peut être rattachée à des considérations physiques simples. Le second terme correspond à la partie principale de l'effet, lorsque $\frac{e}{\varepsilon}$ est infiniment petit ou lorsque la fréquence est infiniment faible : il est facilement calculable de manière élémentaire à partir des f. e. m. correspondant à la répartition du flux en courant continu.

Les valeurs inférieures à celles calculées, relevées expérimentalement, tiennent seulement à ce qu'elles ont été obtenues sur des bobines relativement courtes sans fer qui réalisent mal les hypothèses de la théorie.

Avec des bobines infiniment longues, si l'on considère la répartition des lignes de force dans un plan passant par l'axe de symétrie du noyau, le point de champ nul se trouverait à la périphérie de l'enroulement. Au contraire, dans le cas d'un bobinage de longueur finie, le point de champ nul se trouve à l'intérieur de cet enroulement. Le champ extérieur ne peut plus être négligé et le champ intérieur s'en trouve réduit, ce qui diminue les pertes par courants parasites.

Dans le cas des transformateurs, qui réalisent mieux les hypothèses de Sommerfeld, les discordances seraient plutôt de signe contraire aux précédentes.

M. de Pistoye cite le cas de transformateurs dont les enroulements étaient constitués par des conducteurs en cuivre plat de 40 ou 60 mm de hauteur et de 1 cm à 1,3 cm d'épaisseur pour lesquels on a trouvé aux essais des pertes en court-circuit atteignant 1,8 fois environ les pertes calculées.

STATIONS CENTRALES ET SOUS-STATIONS AUTOMATES ⁽¹⁾

par M. P. d'AUDEVILLE

Ingénieur à la Compagnie Electro-Mécanique

Généralités. — Avantages des centrales automatés. — Principes du fonctionnement (comparaison des machines synchrones et asynchrones, mise en route, arrêt, fonctionnement normal, protection, dégrilleurs, signalisation). — Descriptions d'installations. — Comparaisons financières.

I. — Généralités

L'installation de centrales automatés ou semi-automatés, pratiquée en Amérique depuis de nombreuses années, a fait sa première apparition importante en France, en 1922, avec la Centrale de la Loula de la Société de Fure et Morge et de Vizille, et n'a commencé à se répandre que depuis peu en Europe et plus récemment encore en France. Il est curieux de constater que le développement de ces centrales y est actuellement des plus réduits et nous croyons qu'il est possible d'attribuer ce fait aux motifs suivants :

1° Le petit nombre d'usines automatés existantes, tout au moins pour des unités de quelque importance, ne permet pas de présenter aux exploitants une liste d'installations qui, en quantité, leur paraisse suffisante. Ils ont l'impression que l'installation qu'ils pourraient commander, va servir de station d'essai, alors qu'en réalité elle n'utiliserait que des principes employés dans de nombreuses stations automatés européennes ou mondiales et des appareils déjà en service, non seulement dans celles-ci, mais encore dans des centrales surveillées.

2° De plus, la nécessité de l'automatisme n'apparaît pas immédiatement, principalement dans les centrales modernes où les moyens de contrôle sont poussés très loin et facilitent la tâche du personnel qui peut être déjà réduit dans des proportions importantes. Ce développement des organes de contrôle ou de protection est tel que, dans

(1) Communication présentée en séance publique de la Société Française des Electriciens le 4 janvier 1930.

bien des cas, il serait possible, grâce à l'addition d'un très petit nombre d'appareils, d'assurer le fonctionnement semi-automatique d'installations existantes, c'est-à-dire de n'utiliser le personnel que pour la mise en route et l'arrêt à volonté ; ces légères modifications permettraient de réduire encore les heures d'utilisation de celui-ci à la centrale même, mais obligeraient, quand même, à maintenir un certain effectif pour ces mises en route et arrêts. Si, au contraire, on veut continuer à chercher dans cette voie la diminution de main-d'œuvre, il est tout indiqué de transformer l'installation en station complètement automate.

II. — Avantages des centrales automatiques

En effet, l'intérêt de ces installations est double, au point de vue sécurité d'abord, au point de vue prix de revient ensuite.

A) AU POINT DE VUE SÉCURITÉ

A l'heure actuelle, dans beaucoup d'installations pourvues de nombreux moyens de protection et de contrôle, le personnel de surveillance est inoccupé la majeure partie du temps ; aussi, lors de perturbations, n'est-il pas toujours à même d'intervenir aussi rapidement qu'il le devrait et, en tous cas, moins rapidement qu'un appareil automatique, dont la sensibilité peut être poussée très loin et qui de plus est toujours prêt à agir immédiatement. Au contraire, l'attention du personnel peut, au moment critique, être attirée sur un autre point, en particulier par les lectures que beaucoup d'exploitants lui font effectuer en vue d'entretenir son activité et de maintenir son esprit toujours en éveil. En outre, la manœuvre sera exécutée au moins aussi correctement, et presque toujours plus, avec un dispositif automatique que par une manœuvre manuelle.

Nous connaissons des installations importantes munies de relais à retour d'énergie où le couplage est effectué à la main ; mais lors de ce couplage, de fréquents déclenchements à retour se produisaient, si bien que le personnel a maintenant l'habitude de court-circuiter ces relais à retour tant que la machine n'est pas reliée au réseau ; on conçoit qu'il serait possible de maintenir pendant le démarrage la protection assurée par le relais à retour en utilisant un procédé automatique de couplage.

B) AU POINT DE VUE ÉCONOMIE

Le prix de vente de l'énergie dépend pour une installation hydro-électrique de trois facteurs principaux :

- 1° Coût brut de l'énergie.
- 2° Dépense d'intérêt et d'amortissement.
- 3° Energie totale fournie.

Le coût brut de l'énergie est constitué, dans le cas d'une centrale hydro-électrique, par les seules dépenses d'entretien ; ces frais représentent un pourcentage du coût total de l'énergie très différent suivant l'importance des usines et variant en sens inverse de leur puissance. La partie la plus importante de ces frais d'entretien est constituée par les salaires du personnel et les avantages qui lui sont accordés ; nous devons chercher à les réduire, donc à diminuer le nombre des surveillants, ce qui ne peut être obtenu, sans nuire à la marche de la Centrale, qu'en les remplaçant par des appareils automatiques, remplacement dont il restera à justifier l'économie.

Les dépenses d'intérêt et d'amortissement peuvent être réduites pour des installations automates puisque les bâtiments mêmes de la centrale peuvent être restreints ; en effet, elle n'est utilisée par le personnel qu'en cas de visite ou de révision, et il est possible, par conséquent, d'échapper à certaines prescriptions administratives déterminées par la présence permanente du personnel. La suppression du terrain et des bâtiments pour le logement du personnel est une nouvelle cause de réduction de ce chapitre.

Dans le cas de barrage-réservoir, l'eau emmagasinée représente une valeur propre qu'il est intéressant d'utiliser dans certaines conditions nettement définies d'heure et de puissance fournie, obligeant à des mises en route et arrêts fréquents, conditions qu'il est possible de remplir automatiquement et plus rigoureusement qu'avec un personnel pas toujours très spécialisé.

L'énergie totale fournie doit être rendue maximum ; il faudra donc faire travailler les groupes le plus près possible de leur rendement maximum, ce qui conduit encore à de fréquentes mises en service et hors service et cette fourniture maximum d'énergie vient encore souligner l'intérêt de la sécurité.

En outre, l'emploi de centrales automates permet la réalisation d'installations qui, sans cette automaticité, ne sauraient être envisa-

gées pour des raisons de non-accessibilité, due, par exemple, à leur altitude élevée ou à leur éloignement de tout centre habité.

Nous allons étudier, tout d'abord, les principes de fonctionnement de centrales automates, ce qui nous permettra de déterminer, au fur et à mesure, les appareils nécessaires, et nous examinerons ensuite quelques installations réalisées en décrivant brièvement leur mode de fonctionnement.

III. — Principes du fonctionnement

A) COMPARAISON DES MACHINES SYNCHRONES ET ASYNCHRONES

L'équipement des centrales peut s'effectuer au moyen de machines asynchrones ou synchrones. Les premières installations comprenaient des unités asynchrones, telle celle de Göschenen (Suisse) ; ce choix s'expliquait alors par la plus grande simplicité du schéma et des dispositifs à employer. La tendance actuelle est de prévoir des machines synchrones et ce choix s'explique si l'on compare les avantages et les inconvénients des deux systèmes, avantages et inconvénients que nous rappellerons ici très brièvement.

Les avantages de la machine asynchrone sont les suivants :

Suppression de l'excitatrice.

Simplification de l'appareillage, du fait de la suppression :

- a) de l'excitatrice,
- b) du réglage de tension,
- c) du régulateur de vitesse,
- d) du couplage, qui est réalisé simplement par des interrupteurs normaux munis de résistances de choc pour amortir l'appel du courant à l'enclenchement.

Prix de revient plus réduit de 15 à 20 pour cent.

Rendement un peu plus élevé, ce qui, dans les mêmes conditions, entraîne une diminution du prix de revient du kilowatt-heure fourni.

Compensation possible de l'effet de capacité sur les réseaux à haute tension, lorsque le courant réactif est fourni par d'autres centrales, ce qui peut supprimer la marche des alternateurs en sous-excitation.

Les inconvénients de la machine asynchrone sont les suivants :

Nécessité de lui fournir du courant réactif, ce qui, dans le cas où celui-ci est produit par d'autres usines, entraîne une chute de tension

supplémentaire et des pertes en ligne, diminuant la capacité de transport de la ligne si elle est déjà établie, ou augmentant le prix de la ligne si elle doit être construite.

Impossibilité de faire fonctionner des machines asynchrones seules sur un réseau, ce qui empêche leur emploi dans une usine de secours isolée.

Impossibilité de réduire rapidement le courant en cas de court-circuit, comme on le fait, avec les machines synchrones, en coupant l'excitation.

Réduction du facteur de puissance aux charges réduites, ce qui conduit à avoir toujours le plus petit nombre possible de groupes en service ; cette réduction ne peut être diminuée par une augmentation du nombre de groupes qui grèverait lourdement les frais d'établissement et diminuerait les rendements unitaires, les machines étant plus faibles.

Cette réduction du facteur de puissance pourrait être évitée par l'addition d'un compensateur de phase, mais ce dispositif présente le double inconvénient de diminuer la simplicité de l'installation, ce qui est particulièrement gênant dans le cas de centrales automates, et d'augmenter le prix.

Il n'est toutefois pas possible d'installer, pour un réseau donné, une puissance indéterminée, produite par des unités asynchrones, car il y a lieu de tenir compte des puissances réactives qu'elles nécessitent pour leur fonctionnement.

La figure 1 montre qu'une centrale fournissant 1 000 kVA, avec un facteur de puissance égal à 0,8, représentée par OM, doit pour fournir sous le même cosinus, une puissance de 1 500 kVA, représentée par OP, être munie d'unités fournissant 900 kVA de puissance réactive.

Si nous prévoyons cet accroissement de puissance par une génératrice asynchrone travaillant à $\cos \varphi = 0,9$, en arrière, elle absorbera une puissance réactive représentée par B"Q soit 193 kVA, de sorte que les génératrices synchrones fourniront ainsi :

1.093 kVA, au lieu de 900
et travailleront à

$\cos \varphi = 0,59$ au lieu de 0,8.

Dans certains cas, on pourrait même être conduit à maintenir des alternateurs en service uniquement pour fournir la puissance magnétisante.

Si, de plus, la charge du réseau devenait inférieure à la puissance de la génératrice asynchrone, les alternateurs fonctionneraient en moteurs synchrones.

Pour la marche automatique, nous devons prévoir la mise en route et l'arrêt, les réglages et la surveillance.

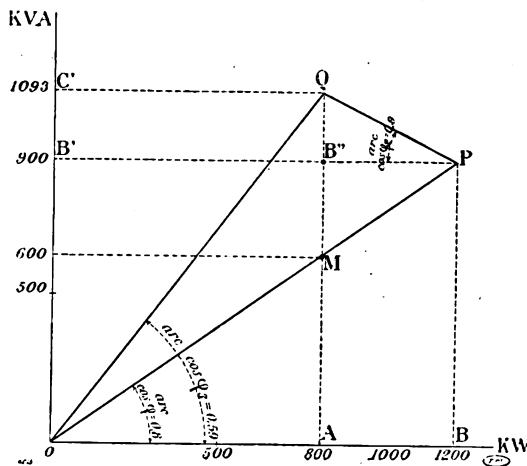


Fig. 1. — Diagramme comparatif de fonctionnement des machines synchrones et des machines asynchrones.

B) MISE EN ROUTE

La mise en route nécessite la transmission d'un ordre à un appareil provoquant hydrauliquement, mécaniquement ou électriquement la succession des manœuvres nécessaires.

1° Transmission de l'ordre

Pour la transmission de l'ordre, indiquons qu'elle peut être réalisée à distance, soit par fils pilotes, soit sans fils pilotes ; le premier procédé ne présente aucune difficulté, les précautions habituelles devant simplement être prises, dans le cas d'utilisation de poteaux haute tension. Ce procédé offre l'inconvénient de nécessiter $n+1$ fils pour une installation de n machines ; il est indiqué si ce nombre est important, de prévoir alors une installation contrôlée à distance qui permettra, au moyen d'un nombre plus réduit de fils, cinq par exemple,

de commander la centrale comme une centrale ordinaire. Nous ne parlerons pas ici de telles installations qui sortent du cadre de cette conférence.

Nous signalons simplement que la commande sans fils pilotes peut être théoriquement réalisée par émission à haute fréquence et à fréquences différentes sans fil ou par courant porteur, avec condensateurs réels ou avec condensateurs artificiels constitués par des fils parallèles aux lignes haute tension.

La commande peut encore être obtenue par variation de fréquence dans le cas d'exploitations particulières, cette variation servant à l'en-

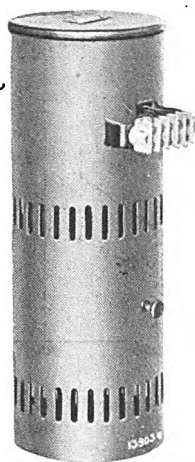


Fig. 2. — Relais d'échauffement.

clenchement des relais de mise en route ou d'arrêt ; mais on conçoit que le champ d'application d'un tel procédé soit très limité.

Un dispositif souvent adopté est celui de la manœuvre de l'interrupteur de ligne qui, par sa fermeture ou son ouverture, agit sur le relais de mise en route et d'arrêt grâce à un transformateur auxiliaire placé dans la centrale automate.

Il est possible de réaliser la mise en marche et l'arrêt sous la dépendance de différentes causes : niveau de l'eau, heure, charge, etc... ; ce dernier moyen utilise un relais d'échauffement qui permettra de ne mettre en route que le nombre de machines correspondant à la demande d'énergie, ce qui est particulièrement intéressant pour des usines à accumulation. Un tel relais est représenté par la figure 2, il est

alimenté par le secondaire d'un transformateur d'intensité, dont le primaire est parcouru par le courant de la machine, et est muni d'orifices réglables de ventilation fixant son coefficient de rayonnement d'après celui de la machine. On a donc ainsi un dispositif présentant toute garantie pour l'échauffement de la machine quelles que soient les variations de charge.

2° Procédés de mise en route

Les procédés, proprement dits, de mise en route peuvent se ramener à deux : démarrage par l'alternateur ou la génératrice asynchrone ou démarrage par la turbine.

Le procédé de démarrage en asynchrone peut nécessiter, pour un alternateur, l'exécution d'amortisseurs augmentant le prix de la machine ; il s'effectuera en deux temps. Premier temps : application d'une tension réduite évitant un appel de courant trop important ; deuxième temps : fermeture sur la pleine tension ; lorsque la vitesse de synchronisme est atteinte, on provoque par un contact et un électro-aimant l'ouverture du distributeur.

Le deuxième procédé est actuellement préféré, car il rend le processus du démarrage identique à celui d'une centrale surveillée, il est particulièrement recommandable pour des unités dépassant 1 000 kVA, en particulier à cause des à-coups de courant, mais il conduit évidemment à des dispositifs moins simples nécessitant des réglages préalables.

Le démarrage par la turbine sera réalisé en provoquant l'ouverture du vannage ou de la vanne, par servo-moteur hydraulique pour les chutes d'au moins 25 mètres, ou par moteur électrique, ou par commande mécanique. Le choix du dispositif vanne ou distributeur sur lequel il faut agir dépend de la construction de la turbine et de l'étanchéité du vannage. Quand la turbine atteint une vitesse suffisante, la pompe à huile du régulateur assure alors le fonctionnement de celui-ci. Pour certains régulateurs, il faut prévoir une pompe auxiliaire pour le démarrage, la pression d'huile étant indispensable pour permettre l'ouverture du distributeur. Les appareils nécessaires sont ici d'un modèle courant ne présentant aucune particularité intéressante.

Quand le démarrage a été assuré, il faut ensuite coupler la machine sur le réseau.

Pour une machine asynchrone, il suffira de fermer l'interrupteur à une vitesse sensiblement égale à la vitesse synchrone, au moyen d'un contact dépendant de la position du régulateur, ou d'un relais de tension. On évite les à-coups de courant importants par l'insertion d'une résistance avant l'application de la pleine tension.

Pour une machine synchrone, il faut régler sa tension l'amener au synchronisme, l'amener en phase, puis effectuer la fermeture de l'interrupteur.

a) *Réglage de tension.* — Le réglage de la tension sera effectué par un régulateur automatique d'un des systèmes habituellement employés. Si l'unité automatique est de faible puissance, par rapport au réseau, on pourra, dans certains cas, ne pas la munir de régulateur automatique de tension, celle-ci étant imposée par les autres unités du réseau.

b) *Mise au synchronisme.* — Pour amener l'alternateur au synchronisme, il suffira d'agir sur le régulateur au moyen d'un moteur électrique. Parmi les appareils employés pour cette mise en vitesse, nous citerons : la dynamo tachymètre montée en bout d'arbre de l'alternateur, dont la tension variant avec la vitesse agit sur un relais très sensible provoquant la rotation du moteur du distributeur dans le sens correspondant à l'ouverture ou à la fermeture, selon que la vitesse est inférieure ou supérieure à la vitesse de synchronisme ; ce dispositif a l'inconvénient d'exiger un relais très sensible qui a été réalisé sous forme de relais différentiel.

On a quelquefois songé à utiliser des dispositifs purement mécaniques tels que contacts sur le régulateur, provoquant la fermeture ou l'ouverture quand la vitesse dépasse d'environ 3 pour 100 la vitesse normale, ou lui est inférieure de la même quantité.

Nous vous signalerons, en passant, un appareil de variation de vitesse particulièrement intéressant, car il tient compte du seul facteur à envisager qui est, non la vitesse, mais la différence des fréquences du réseau et de l'alternateur.

L'appareil (fig. 3) est constitué par un stator et un rotor triphasés connectés l'un à l'alternateur, l'autre au réseau. L'axe du rotor supporte une came qui actionne, en tournant un dispositif à double contact, dont l'un ou l'autre ferme le circuit d'un moteur monophasé à double enroulement agissant sur le vannage pour provoquer la rotation dans un sens ou dans l'autre, suivant le sens de rotation du rotor.

La vitesse du rotor étant proportionnelle à la différence de fréquence, la vitesse d'ouverture ou de fermeture du vannage lui sera

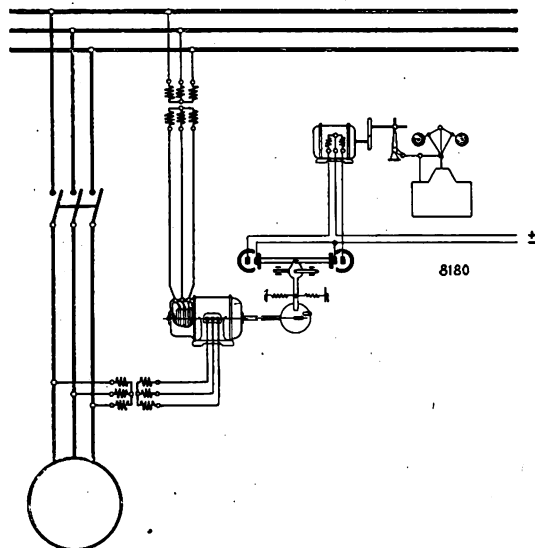


Fig. 3. — Schéma de l'appareil de mise en vitesse synchrone.

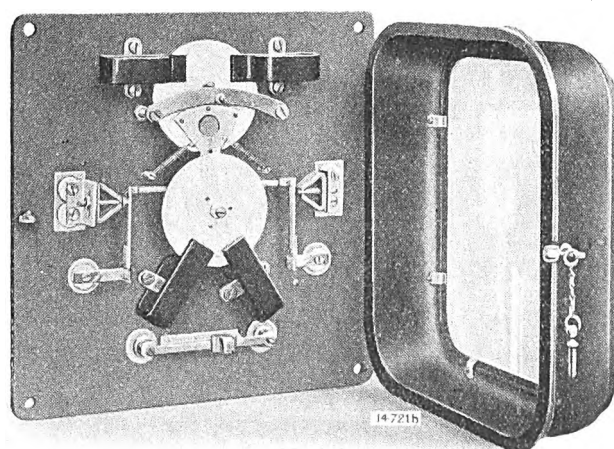


Fig. 4. — Ensemble de l'appareil de mise en vitesse synchrone.

également proportionnelle. La figure 4 montre la disposition de l'appareil. Les contacts sont situés sur les côtés ; ils sont pourvus d'aimants permanents assurant leurs déplacements brusques. Un dispositif amor-

tisseur placé au centre maintient les contacts fermés pour d'importantes différences de fréquence assurant une coïncidence plus rapide.

Le diagramme figure 5 indique d'ailleurs la rapidité (environ 2 minutes et demi) avec laquelle la vitesse de synchronisme est atteinte, le premier passage à cette vitesse s'effectuant environ 50 secondes après la mise en route.

c) *Mise en phase.* — Pour pouvoir coupler l'alternateur, il faut ensuite choisir l'instant des coïncidences de phase. Un appareil de cou-

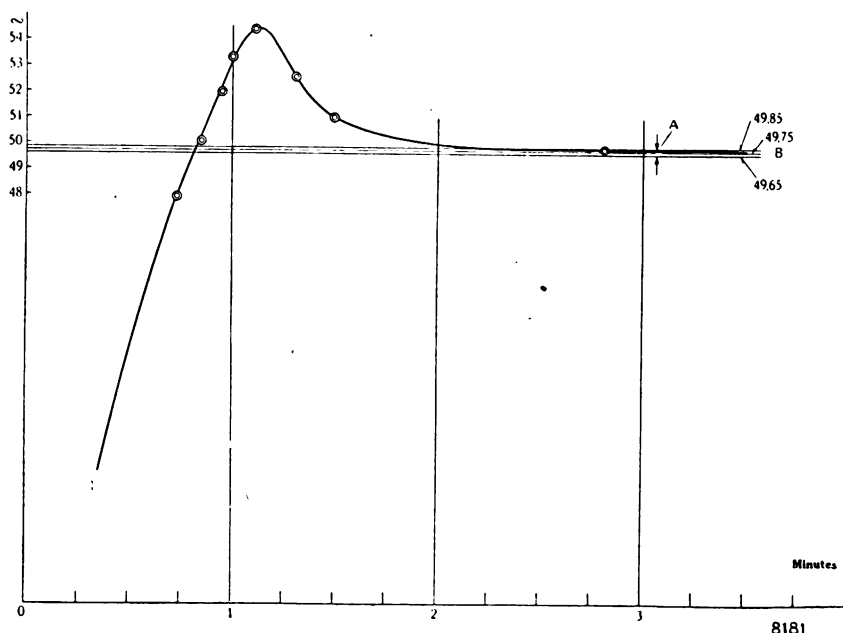


Fig. 5. — Diagramme de l'appareil de mise en vitesse synchrone.

plage automatique qui a déjà donné, depuis longtemps, d'excellents résultats comprend un relais à action différée utilisant le principe de Ferraris avec dispositif amplificateur. Le relais est constitué par un disque d'aluminium, soumis à l'action du champ tournant créé par deux électro-aimants connectés en série et reliés aux phases de chaque côté de l'interrupteur à coupler de manière à leur appliquer la tension totale lorsque les unités à coupler sont en phase. Quand le disque est soumis à cette double tension, il enroule, par sa rotation, un cor-donnet : celui-ci provoque la fermeture du contact assurant par un relais auxiliaire la fermeture de l'interrupteur à condition que cette

pleine tension, c'est-à-dire la coïncidence des phases, se soit maintenue un temps suffisant.

Pour augmenter la rapidité de manœuvre de l'appareil, celui-ci est muni d'un dispositif constitué par un disque d'aluminium influencé par deux électro-aimants reliés respectivement aux deux tensions. Ce disque se met en mouvement sous l'influence de la différence de phase pour insérer ou supprimer des résistances montées en série avec les premières bobines. Ce dispositif réduit le courant, donc la rotation du disque du relais à action différée, quand les phases sont près de l'opposition et augmente son amplitude lorsque les phases ont la même direction ; il en résulte, à ce moment, un enroulement très rapide du cordonnet et un couplage presque immédiat.

Un dispositif de butée permet, en outre, de décaler le maximum de courant en avant de la tension, donc de rattraper le retard dû au temps d'enclenchement de l'interrupteur.

Dans certains cas particuliers où la tension du réseau varie dans des limites importantes, on modifie légèrement cet appareil pour le rendre, en outre, encore plus sensible. Dans ce but, les bobines sont montées, non en série, mais en parallèle, sur la tension totale comme précédemment, l'une par l'intermédiaire des résistances variables, et qui fermera le contact lorsque les résistances insérées seront nulles, l'autre par l'intermédiaire d'une bobine de self saturée, dont l'action tend à ouvrir le contact du relais. On peut ainsi arriver à coupler pour des tensions variant dans le rapport 1 et 1,5.

Il est quelquefois possible d'éviter l'installation d'un coupleur automatique dans la centrale principale, en opérant de la façon suivante : L'interrupteur de la centrale automate étant ouvert, en fermant l'interrupteur reliant la centrale principale à la centrale automate, on assure la mise en route de la turbine ; on ouvre après un temps suffisant, l'interrupteur de la centrale principale, ce qui, par l'intermédiaire de relais, permet alors à l'interrupteur de la centrale automate de se fermer, le couplage s'effectue ensuite à la centrale principale.

C) ARRÊT

L'arrêt normal de la centrale s'obtiendra par un dispositif agissant en sens inverse de celui employé pour sa mise en route.

Si l'on utilise des fils pilotes, on pourra employer un relais, qui, avant la mise en route, envoie le courant des fils pilotes sur le dispo-

sitif de mise en route, et qui, la mise en route effectuée, étant alimenté par le courant de la dynamo-tachymètre, par exemple, les branche sur le dispositif d'arrêt.

Par exemple, l'ouverture de l'interrupteur de ligne, la puissance à fournir étant nulle, provoquera la fermeture du régulateur de la turbine et l'on utilisera cette fermeture pour fermer un contact agissant sur un relais à temps destiné à assurer le déclenchement de l'interrupteur de couplage et à assurer la fermeture du vannage. La temporisation a pour but de permettre la mise en route, puisqu'au démarrage le contact de la turbine est fermé. L'ouverture de l'interrupteur par suite de la décharge brusque provoque un emballement que l'on peut utiliser, par un relais de surtension pour agir sur les organes de déclenchement et de fermeture.

Dans certains cas, par exemple, puissance importante de la machine par rapport au réseau, il peut être intéressant de ne pas prévoir une décharge brusque, il suffit d'assurer d'abord la fermeture du vannage et quelque temps après l'ouverture de l'interrupteur.

D) FONCTIONNEMENT NORMAL

La mise en route et l'arrêt normal étant effectués par un procédé quelconque, il faut maintenant assurer le fonctionnement normal de l'installation, le contrôle de ce fonctionnement et l'arrêt en cas d'accident.

Normalement, le réglage de tension devra être effectué automatiquement, ainsi que celui du distributeur par le régulateur servant à maintenir la vitesse constante.

Dans certains cas, l'ouverture du distributeur pourra être soumise à l'influence du niveau d'eau, particulièrement lorsque des prescriptions administratives sont imposées dans l'intérêt général au sujet de ses variations limites. On utilisera un indicateur de niveau d'eau provoquant, par des contacts espacés, selon la hauteur de l'eau, de 10 cm par exemple, la fermeture d'un circuit provoquant, par un relais, la rotation du moteur du distributeur dans un sens ou dans l'autre, suivant la hauteur du niveau. Cette ouverture du distributeur peut aussi être fonction d'une horloge à contacts réglables.

On peut également utiliser dans certains cas une commande par fils pilotes pour agir à volonté sur ces mêmes organes.

E) PROTECTION

La protection de l'installation doit être prévue contre deux genres d'incidents, les uns temporaires, ne nécessitant la mise hors service que pendant un temps très court qui doit être réduit au minimum compatible avec la sécurité, les autres exigeant un arrêt immédiat et complet et demandant, par leur importance, l'intervention du personnel.

1° *Court-circuit extérieur*

C'est ainsi qu'un court-circuit extérieur ne devra arrêter la centrale que s'il présente un caractère très grave susceptible de détériorer la

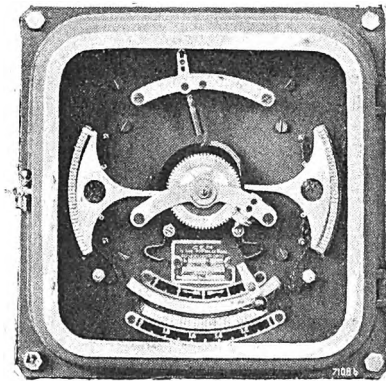


Fig. 6. — Régulateur-limiteur d'intensité.

machine. D'ailleurs, en vue d'éviter le plus possible une mise hors circuit qui nécessite un nouveau couplage, il est très indiqué d'employer non pas un simple relais à maxima d'intensité, mais un appareil (fig. 6) agissant sur l'excitation de la machine, ou, plus exactement sur celle de son excitatrice, en vue de réduire son importance, pour diminuer cette excitation en cas de surcharge et limiter l'intensité à une valeur choisie d'avance, non dangereuse pour la machine. Cet appareil est prévu pour fonctionner en même temps que le régulateur de tension qui tend à agir en sens inverse de celui-ci, mais les caractéristiques des appareils sont telles que l'action du régulateur-limiteur d'intensité est prépondérante. Ainsi, non seulement la machine est protégée, mais en outre l'extinction de l'arc de court-circuit.

est favorisée et le travail des interrupteurs automatiques réduit par la diminution de la puissance à couper.

Si ce court-circuit présente un caractère très grave, il se peut que l'excitation ne puisse être réduite à une valeur assez faible pour ramener l'intensité à sa valeur normale ; dans ce cas, on provoquera le déclenchement de la centrale automate et son arrêt ; mais sa mise en service devra pouvoir s'effectuer à nouveau dès que le court-circuit aura disparu ; on peut même envisager, en vue de gagner du temps et de simplifier les manœuvres que cette remise en service soit rendue automatique à la disparition du court-circuit, le groupe ayant même

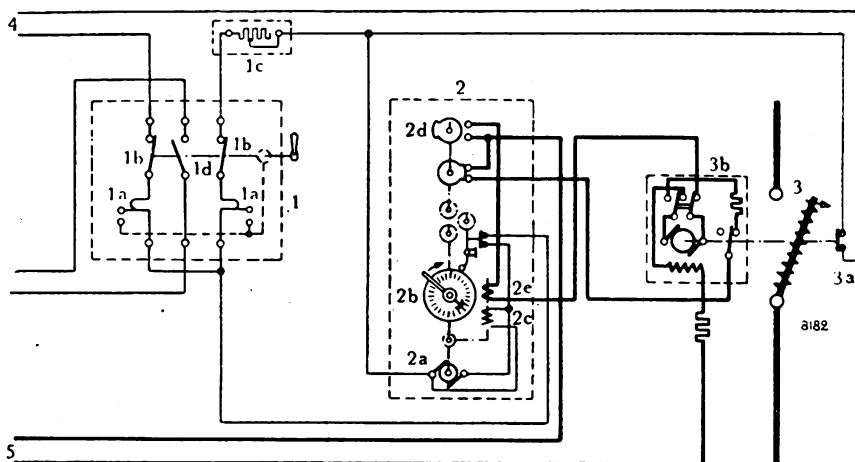


Fig. 7. — Schéma de principe du dispositif à réenclenchement limité.

- | | |
|---|--|
| 1 — Organe de blocage | 2c — Déclencheur à tension nulle |
| 1a — Déclencheur thermique | 2d — Contact |
| 1b — Contact de blocage | 2e — Bobine de retenue |
| 1c — Résistance réglable | 3 — Interrupteur principal |
| 1d — Contact auxiliaire d'alarme | 3a — Contact, |
| 2 — Appareil de réenclenchement pour courant alternatif | 3b — Commande électrique |
| 2a — Organe moteur | 4 — Réseau auxiliaire à courant alternatif |
| 2b — Réglage du temps | 5 — Réseau auxiliaire à courant alternatif ou continu. |

continué à tourner à vide si l'on utilise une chute au fil de l'eau. On peut employer, dans ce but, des dispositifs à réenclenchements limités. Un de ces dispositifs répond au schéma de principe représenté fig. 7, établi pour une sous-station, mais qu'il est facile d'appliquer à une centrale automate.

Il comprend deux relais, dont un à action différée. Le premier qui est un appareil de blocage a normalement ses contacts fermés et ceux-

ci s'ouvrent en cas d'accident devant, du fait de son importance, isoler l'installation. En cas de court-circuit extérieur, le premier relais est mis sous tension et le deuxième aussi à travers 1 b et 3 a ; lorsque le temps pour lequel est réglé le dispositif 2 b s'est écoulé, il ferme le contact 2 d au moyen du moteur 2 a constitué par un aimant oscillant dans un champ alternatif. Cette fermeture de 2 d provoque l'enclenchement de l'interrupteur, coupant le circuit de la bobine et ouvrant 2 d, ce qui ouvre le circuit de la bobine de retenue 2 c et assure le retour à zéro du deuxième relais. Si l'interrupteur déclenche, par

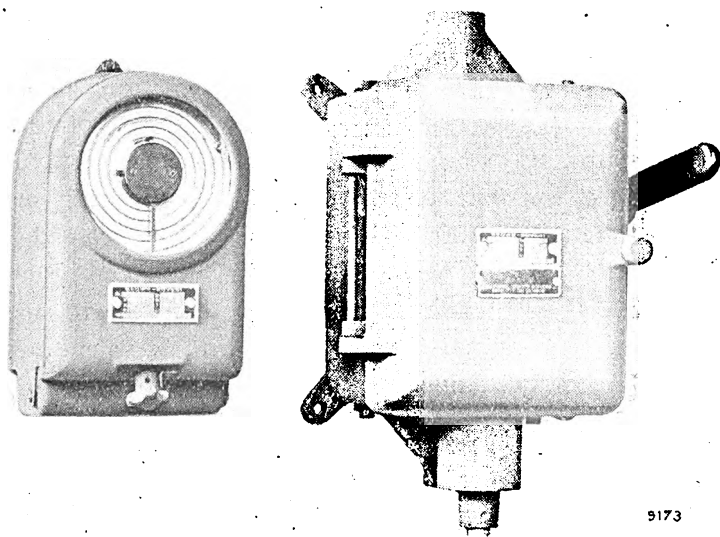


Fig. 8. — Appareil de réenclenchement limité.

suite du maintien du court-circuit, les mêmes phénomènes se reproduisent tant que le relais 1 n'aura pas bloqué le système.

Les déclencheurs thermiques 1 a, alimentés à courant constant, mais réglable par la résistance 1 c, déterminent le temps au bout duquel le dispositif mis hors circuit n'assure plus de réenclenchement ; en cas de déclenchements successifs, ils ne sont coupés que pendant la fermeture de l'interrupteur, de durée très courte, n'influençant pratiquement pas le temps qui leur est nécessaire pour atteindre l'échauffement correspondant au blocage ; 1 d est un contact de signalisation. L'ensemble du dispositif est représenté par la figure 8.

2° Court-circuit interne

Par contre, un court-circuit interne doit provoquer un arrêt immédiat, sous peine de risquer de gros accidents, et bloquer en outre le dispositif de mise en marche ; une nouvelle mise en service de l'installation sans examen par le personnel est empêchée, le déverrouillage du dispositif de mise en route ne pouvant être obtenu que de l'intérieur de la centrale automaie. Dans ce but, un relais à retour agira par l'intermédiaire d'un relais sur le dispositif de fermeture rapide prévu par le turbinier pour pallier au non-fonctionnement éventuel du régulateur ; par exemple, suppression de la pression d'huile pour les régulateurs se fermant au moyen de ressorts de rappel, cloche à air, contrepoids, accumulateur hydraulique, pour ceux nécessitant une pression d'huile pour leur fermeture ; la pompe à huile prévue dans certains cas, pour la mise en route, peut être utilisée pour la fermeture. Si nécessaire, un frein, comme d'habitude, sera prévu sur la partie tournante et son fonctionnement sera assuré par un relais supplémentaire. Il faudra naturellement prévoir un contrôle de ce dispositif de sécurité ; dans le cas de la cloche à air, ce contrôle pourra être obtenu au moyen d'un manomètre qui assurera l'arrêt si la pression exercée par l'air au-dessus de l'huile atteint la valeur minimum admissible pour un bon fonctionnement et au moyen d'un niveau d'huile assurant également l'arrêt si le volume d'air sous pression correspond à une énergie juste suffisante pour obtenir l'arrêt ; c'est ce dispositif qui a été utilisé pour les différentes centrales des Forces Motrices de la Vienne telle que celles de l'Isle-Jourdain représentée sur la figure 9.

Il faudra assurer en même temps le déclenchement immédiat de l'interrupteur automatique et, afin de réduire les risques d'avarie dans la machine, on supprimera le courant dans le circuit d'excitation de l'alternateur, en fermant le circuit de l'excitatrice sur une résistance auxiliaire au moyen d'un commutateur spécial de désamorçage.

3° Echauffement de paliers

C'est également un blocage analogue que doit provoquer un échauffement de palier : l'élévation de température correspondante sera enregistrée par un thermomètre placé dans les paliers qui, muni d'un contact, agira sur le système d'arrêt avec blocage.

4° Emballement

Un emballement pourra aussi être contrôlé soit par un dispositif mécanique, soit par un dispositif électrique, mais devra, en tous cas, arrêter et verrouiller l'installation.

5° Rupture du circuit de contrôle

Si le contrôle de la centrale est assuré au moyen de courant continu fourni par une dynamo auxiliaire, il est indiqué de prévoir également

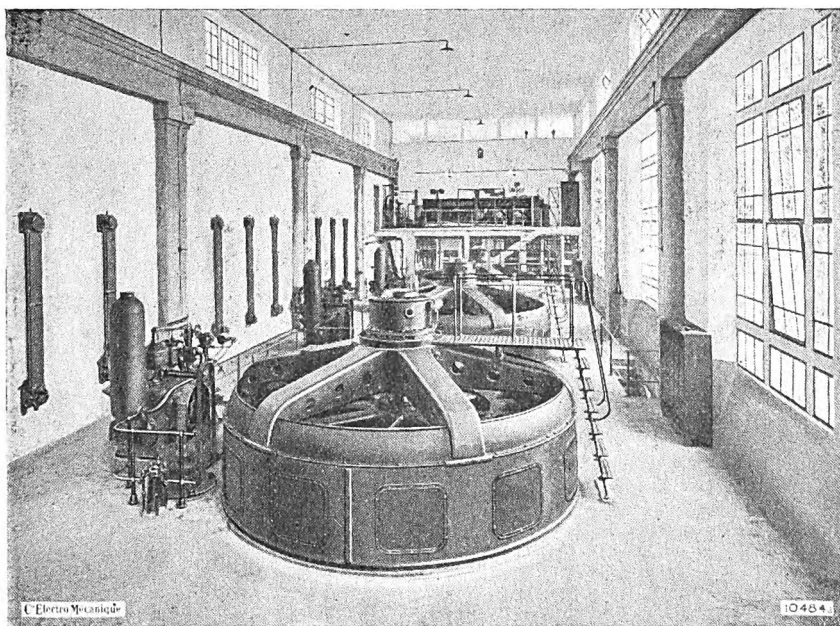


Fig. 9. — Centrale de l'Isle Jourdain
de la Société des Forces Motrices de la Vienne.

ce blocage en cas d'avarie au circuit continu, au moyen d'un relais à tension nulle par exemple, qui agira sur le circuit des organes de fermeture par courant alternatif.

F) DÉGRILLEURS

On utilise aussi certains dispositifs accessoires tels que des dégrilleurs automatiques (fig. 10). Ils sont constitués généralement par des rateaux mobiles sur un plan incliné muni de grilles arrêtant les feuilles ; ces rateaux, en descendant, évitent la grille et ne viennent frotter

sur elle qu'à la montée entraînant les feuilles qui s'y trouvent pour les rejeter dans un canal d'où elles sont éliminées par un léger courant d'eau. Lorsque les dégrilleurs comprennent plusieurs éléments, l'un est à la descente, tandis que l'autre est à la montée, afin d'équilibrer l'ensemble. De plus, il est possible, par un dispositif à horloge, de mettre l'ensemble en service à des intervalles de temps déterminés qui peuvent être variables suivant les heures et les époques, pour tenir compte des importances différentes des apports de feuilles.

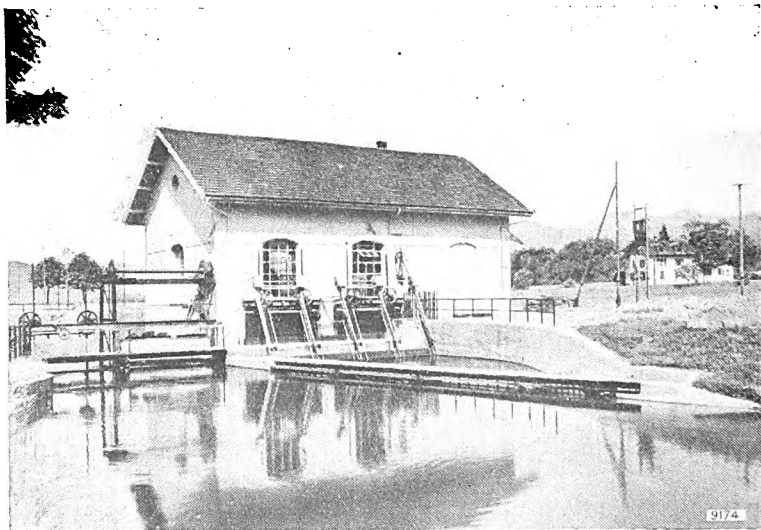


Fig. 10. — Centrale de Blatten. — Vue extérieure montrant les dégrilleurs automatiques.

G) SIGNALISATION

Dans les centrales automatiques, il est bon de prévoir en outre des relais à volets indicateurs signalant immédiatement au personnel venant effectuer la réparation quel est le relais qui a déclenché, de manière à faciliter sa tâche et réduire la durée de l'arrêt.

Remarques générales

Nous insisterons particulièrement sur la nécessité absolue de prévoir des dispositifs pour la mise en route, l'arrêt ou la surveillance automatique tels que les manœuvres s'effectuent sous la dépendance logique les unes des autres, une manœuvre ne pouvant s'exécuter que

si la précédente l'a été ; c'est une série de verrouillages qui doivent se débloquer suivant un ordre choisi à l'avance ; de la sorte, on évite toute fausse manœuvre.

Il faudra aussi s'efforcer, sans nuire bien entendu à la sécurité de fonctionnement, de réduire au minimum le nombre de relais en service, de manière à diminuer le plus possible la puissance qu'ils consomment ; du reste, cette puissance est toujours très faible et généralement de l'ordre de l'hectowatt ou même moins.

IV. — Descriptions d'installations

Pour terminer cet aperçu, nous concrétiserons par quelques exemples, les indications générales fournies précédemment en décrivant quelques installations de centrales automates choisies en vue d'illustrer les dispositifs envisagés.

Comme la question financière joue un rôle très important dans l'étude des centrales, il y aura lieu de proportionner l'appareillage spécial qu'elles nécessitent à l'importance de l'installation. C'est ainsi que pour de très petites unités inférieures à 10 kW, travaillant isolément, on pourra envisager l'emploi de courant continu et utiliser des turbines sans régulateurs entraînant des génératrices compoundées.

Pour des installations plus importantes réalisées en courant alternatif et devant travailler en parallèle avec d'autres, il faudra prévoir un réglage de vitesse, presque toujours un réglage de tension et un dispositif de couplage.

Cet appareillage sera particulièrement réduit par le démarrage en asynchrone comme à Glattfelden (Canton de Zurich) dont le schéma est représenté figure 11. Cette installation comprend un alternateur de 400 kVA à axe vertical, 500 t. m, accouplé à une turbine Kaplan. Elle est mise en route par la fermeture de l'interrupteur de ligne à la Centrale d'Eglisau, provoquant, au moyen d'un transformateur auxiliaire placé dans la centrale automate, l'enclenchement d'un interrupteur à trois positions : déclenchement, démarrage, marche normale. Le transformateur 7 alimente le relais de démarrage 8 à condition que le disjoncteur de verrouillage 6 soit fermé, l'interrupteur 4 de démarrage sur la position démarrage avec arrêt automatique en fin de course. La génératrice démarre à demi-tension. Quand elle a atteint une vitesse voisine du synchronisme, l'excitatrice fournit une tension

telle que le relais 9 est attiré, mettant en court-circuit la résistance insérée dans le circuit d'excitation, de manière à assurer l'excitation de l'alternateur. La fermeture du relais 9 assure l'alimentation du relais 10 à action différée permettant à l'excitation normale de s'établir

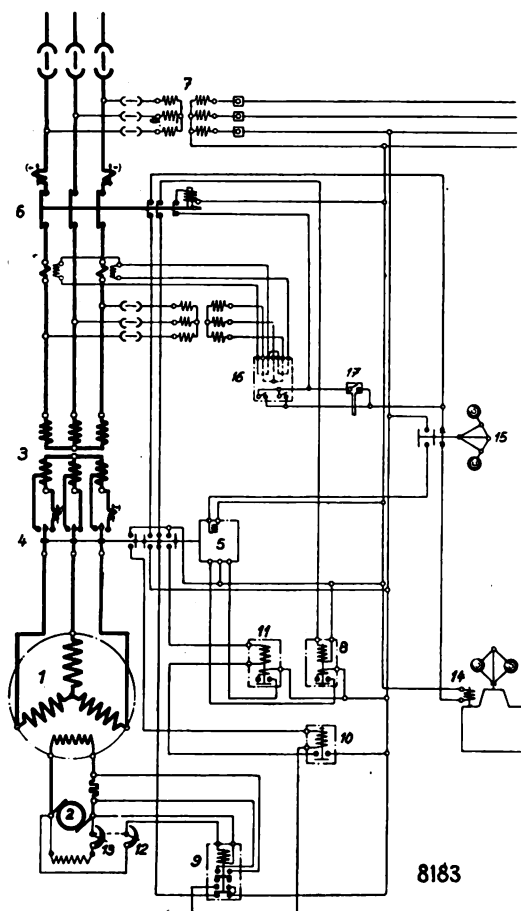


Fig. 11. — Schéma de la Centrale de Glattfelden des Forces Motrices du Canton de Zurich.

avant que soit alimentée, par un relais intermédiaire 11, la commande par moteur dans le sens faisant passer l'interrupteur sur la position marche normale. 12 est un rhéostat qui permet de maintenir constante la tension aux bornes du relais 9, lorsque l'on marche à des excitations différentes ; son mouvement est solidaire de celui du rhéostat. Un con-

tact auxiliaire placé sur l'interrupteur assure, pour cette position, l'alimentation de l'électro-aimant 14 qui ouvre la vanne.

L'arrêt s'effectue par ouverture de l'interrupteur de ligne, d'où décharge, donc emballement. Le dispositif à boules 15 ouvre le circuit de 14, la turbine s'arrête et ferme le circuit de déclenchement du disjoncteur.

Pour des incidents extérieurs, c'est le relais direct de l'interrupteur 4 qui assure le déclenchement, ce qui coupe, 1° le circuit de 14 arrêtant

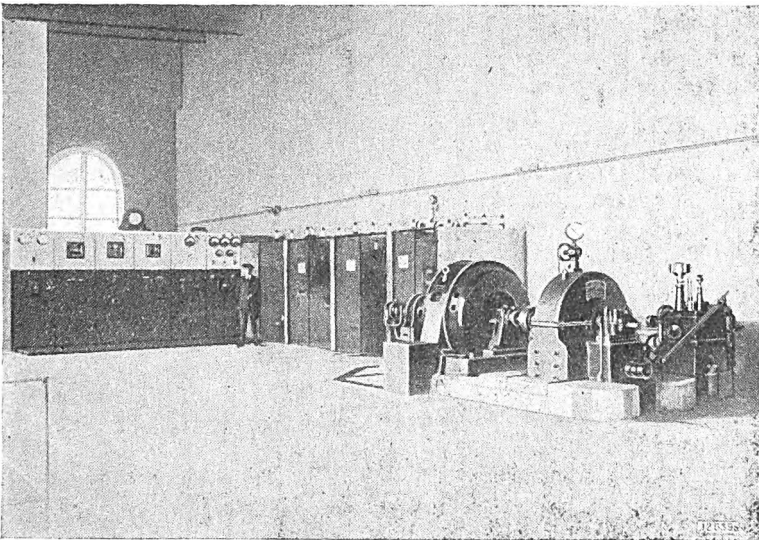


Fig. 12. — Centrale de la Loula de la Société Hyro-Electrique de Fure et Morgé et de Vizille.

la turbine, 2° les circuits de 10 et de 11 pour préparer une remise en route dès que la tension réapparaît.

Pour des incidents tels que court-circuit intérieur, échauffement, c'est l'interrupteur de blocage 6 qui s'ouvre et il ne peut être fermé qu'à la main ; sa bobine de déclenchement est alimentée soit par le relais à retour 16, soit par le thermostat 17, à condition que lui-même soit fermé et que l'interrupteur 4 soit sur la position marche normale.

La figure 12 représente la centrale de la Loula qui comprend un alternateur de 500 kVA, 3 000 V, en service depuis 1922 ; la mise en route est faite par le personnel.

Les Forces Motrices de Saint-Gall et de l'Appenzel possèdent deux centrales à Lienz et à Blatten fonctionnant au fil de l'eau sur le canal latéral du Rhin. Ces deux centrales sont reliées chacune par une ligne à la centrale de Montlingen où se trouve le personnel d'exploitation. Les deux premières comprennent chacune un alternateur vertical 550 kVA, 750 t: m, avec engrenages, la turbine Francis verticale tour-

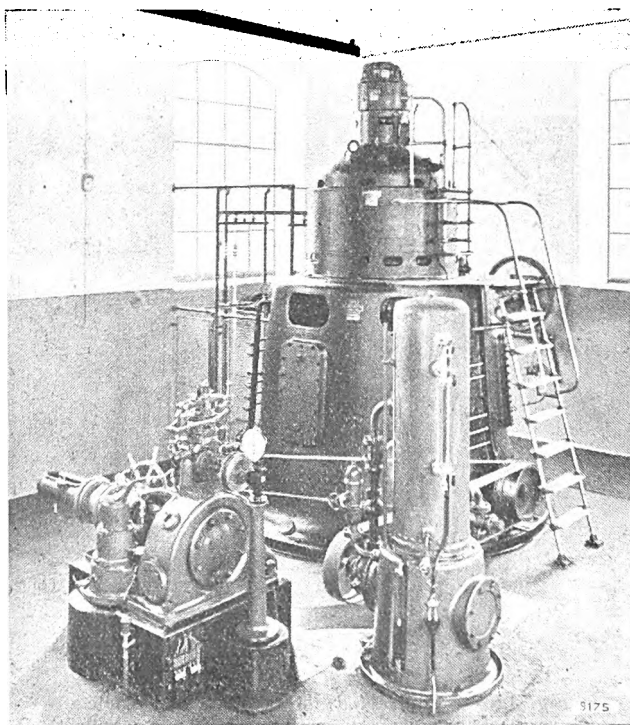


Fig. 13. — Centrale de Lienz des Forces Electriques de Saint-Gall et de l'Appenzel.

nant à 75 t: m. La centrale de Lienz est représentée par la figure 13. On voit à gauche, au premier plan, le régulateur de vitesse. En cas d'accidents, une cloche a été prévue ; elle est visible à droite au premier plan avec son manomètre et son niveau.

Comme la centrale possède obligatoirement un éclusier, celui-ci après s'être assuré que l'interrupteur de Montlingen est ouvert, fermera l'interrupteur de la génératrice de Lienz et son interrupteur d'excitation, en ouvrant le régulateur de la turbine. La variation de vitesse se fait ici par deux contacts placés sur le manchon du régulateur

qui assurent l'oscillation de la vitesse entre les limites choisies et permettent d'effectuer le couplage à Montlingen. L'installation est munie également d'un régulateur-limiteur d'intensité et d'un commutateur automatique de désamorçage. Le déclenchement de l'interrupteur de ligne a lieu pour des perturbations extérieures, et après leur disparition la mise en parallèle s'effectue à Montlingen sans qu'il soit nécessaire d'intervenir à Lienz. En cas d'avaries intérieures, au moyen



Fig. 14. — Interrupteur horaire.

d'une petite batterie auxiliaire, l'interrupteur déclenche à Lienz et l'électro-aimant du distributeur ferme le vannage. Un dispositif de signalisation indique l'appareil qui a provoqué le blocage.

La ville de Saint-Gall possède, à Hofen, une centrale automate avec alternateur de 400 kVA, dont la mise en route s'effectue sous la dépendance du niveau d'eau maximum, l'arrêt sous celle du niveau d'eau minimum ; toutefois à certains moments, la centrale continue à travailler sans tenir compte des indications de niveau et ceci au moyen d'un interrupteur horaire, tel que celui représenté par la fig. 14. Le

démarrage s'effectue en alternateur et le couplage est réalisé par un relais de tension très sensible agissant sur un coupleur automatique.

La centrale de Buchs du Canton de Saint-Gall comprend un alternateur de 900 kVA, 1 000 t:m, 3 000 V, entraîné par turbine Pelton, la figure 15 représente une vue extérieure de cette installation. C'est plutôt une centrale commandée à distance par l'intermédiaire de fils pilotes au nombre de douze qu'une centrale vraiment automate ; toutefois, elle assure automatiquement sa surveillance et son arrêt avec



Fig. 15. — Centrale d'Altendorf du Service des Eaux et de l'Electricité de Buchs (Suisse). — Vue extérieure.

ou sans blocage en cas de perturbations. La mise en route se fait par l'action d'un électro-aimant agissant sur la soupape de la vanne sphérique ; le servo-moteur hydraulique ouvre le pointeau et la turbine démarre. On règle la vitesse à distance par un moteur agissant sur le régulateur, puis on couple en agissant à distance sur la commande de l'interrupteur. En bout d'arbre, du côté turbine, est placée la dynamo-tachymètre commandant les relais, ainsi que le manomètre à contact, qui agit sur le servo-moteur hydraulique pour provoquer la fermeture de la turbine en cas de non-fonctionnement du circuit d'huile du régulateur. On voit sur la figure 16 le servo-moteur et le régulateur. Le réglage de la charge se fait également à distance. L'ins-

tallation est pourvue d'un régulateur-limiteur d'intensité et de thermostats.

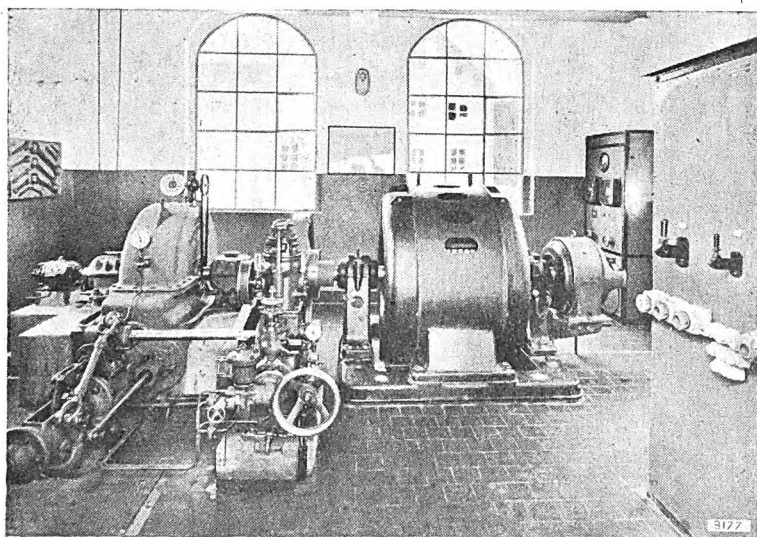


Fig. 16. — Centrale d'Altendorf. — Vue intérieure.

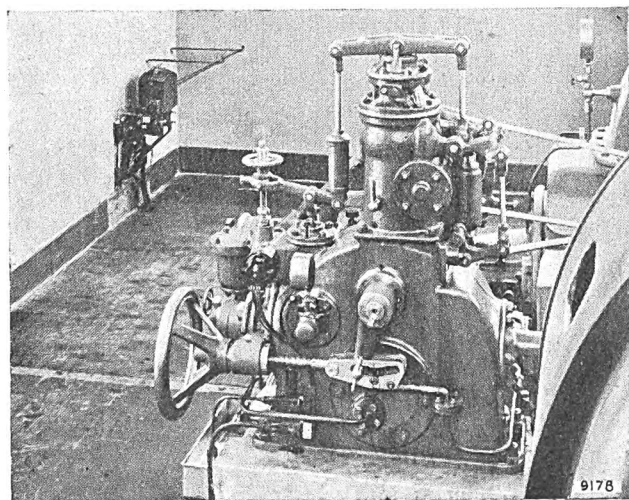


Fig. 17. — Centrale d'Altendorf. — Vue montrant le régulateur de vitesse et l'électro-aimant de commande de vanne.

Sur la figure 17, on voit dans le fond à gauche l'électro-aimant de commande de la vanne sphérique et sur le régulateur, le moteur de réglage de vitesse.

Il est à remarquer que cette commande à distance a nécessité l'emploi de douze fils pilotes et que, d'une façon générale, il aurait été plus intéressant d'employer le dispositif à commande à distance par sélecteurs auquel nous avons déjà fait allusion.

La Centrale de Yokawa au Japon (fig. 18) comprend un alternateur triphasé à axe vertical, 2 000 kVA, 900 t:m, 11 000 V, 60 p:s, dont

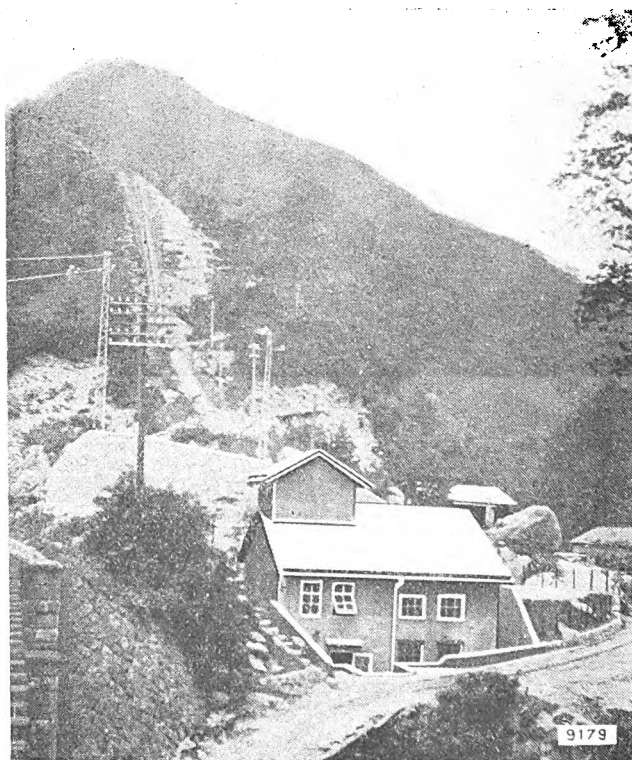


Fig. 18. --- Centrale de Yokawa de la Daido Denry ku K.K. à Osaka (Japon). — Vue extérieure.

on voit l'aspect sur la figure 19. On remarque au-dessus de l'excitatrice la dynamo auxiliaire dont la tension sert pour la mise en service de l'appareil de couplage, pour l'arrêt, soit normal, soit en cas d'accident. La mise en service se fait par fermeture de l'interrupteur de ligne, celle-ci alimentant un transformateur auxiliaire qui fait démarrer le moteur d'un groupe moto-pompe fournissant la pression d'huile nécessaire pour ouvrir le distributeur. Les oscillations de vitesse se produisent par un relais de tension relié à la dynamo-tachymètre.

Le couplage est effectué par un coupleur automatique visible sur la figure 20 représentant le tableau : on y aperçoit également les relais à volets indicateurs, les régulateurs de tension et d'intensité, les commutateurs de commande de l'interrupteur et la poignée de commande du commutateur de désamorçage.

La vue arrière de ce tableau (fig. 21) montre les différents relais,

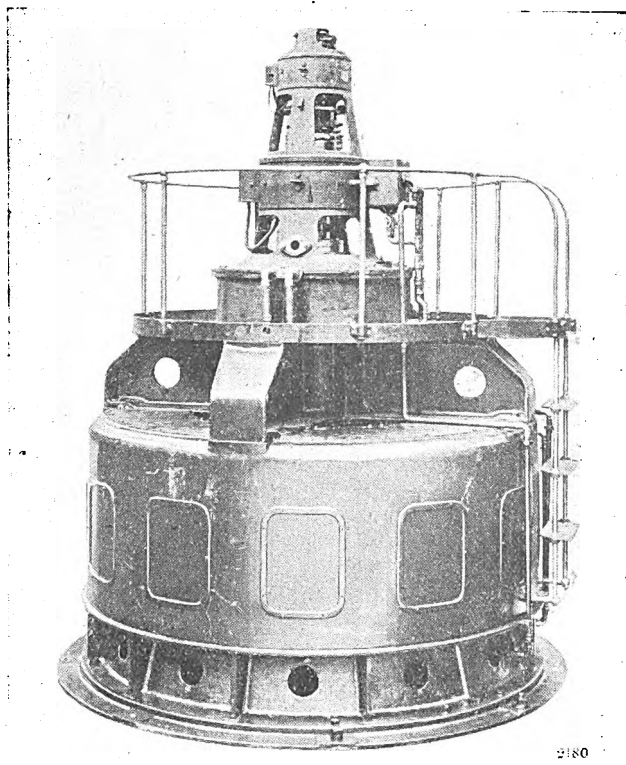


Fig. 19. — Alternateur triphasé 2 000 kVa, 11 000 V, 60 p.s, 900 t.m, de la Centrale de Yokawa.

tandis que la figure 22 donne une idée de l'installation, les dimensions en plan étant de 9 m sur 8.

Nous montrons simplement sur la figure 23 le schéma de cette installation, afin que l'on puisse se rendre compte de l'ensemble que représente une centrale automate. Sans donner de détails spéciaux, indiquons simplement que la mise en service se fait par mise sous tension de la ligne, la variation de vitesse étant obtenue par un relais de tension C_1 .

On constate que, si l'on tient compte des appareils qui seraient nécessaires dans une centrale ordinaire, les appareils supplémentaires sont assez peu nombreux et ne compliquent pas beaucoup le schéma. Ils comprennent ici un relais à maximum de tension X , relais intermédiaire B_1 , relais de réglage de vitesse C_1 , relais d'arrêt sans blocage D_1 , relais auxiliaire d'échauffement I_1 , moteur de réglage de vitesse J_1 , interrupteur fin de course K_1 , thermomètre à contact L_1 , relais à action différée M_1 , relais contrôlant la pression d'huile P_1 , soit

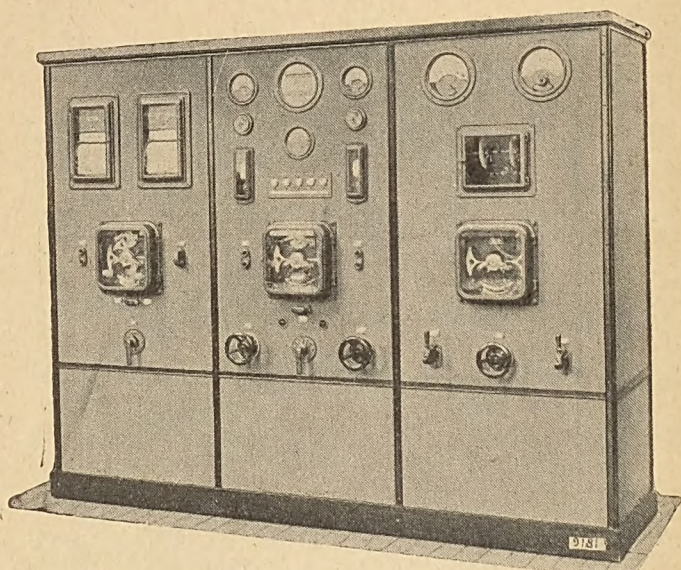


Fig. 20. — Vue avant du tableau de la Centrale de Yokawa.

en somme 7 relais et des thermomètres à contacts, car on peut admettre que le réglage du distributeur, même dans une centrale non automate, aurait été effectué électriquement et même que l'installation aurait, sans doute, comporté un électro-aimant pour parer à un non fonctionnement du régulateur. On remarquera sur ce schéma un dispositif de mesure de température O_1 , tout à fait en dehors de l'automatisme.

La Centrale de Saint-Sulpice, dans le Jura, d'une puissance de 690 kW, est destinée à utiliser au mieux l'énergie hydraulique disponible pour éviter les appels de puissance du réseau. Elle comprend une unité de 240 kW et une de 450 kW.

D'un poste de commande, l'on peut mettre en service l'une ou l'autre machine au moyen de fils pilotes par la mise en service de la pompe à huile du distributeur, l'appareil de réglage de vitesse et l'appareil de synchronisation automatique assurant le couplage. A noter un dispositif spécial assurant la mise en vitesse dans le cas où, par suite d'une obstruction de l'admission, le régulateur n'agirait pas, par suite de la trop faible vitesse ; dans ce cas, un dispositif de relais provoquerait la rotation du moteur de réglage du distributeur pour ouvrir celui-ci. Les circuits de contrôle sont alimentés par une dynamo-tachy-

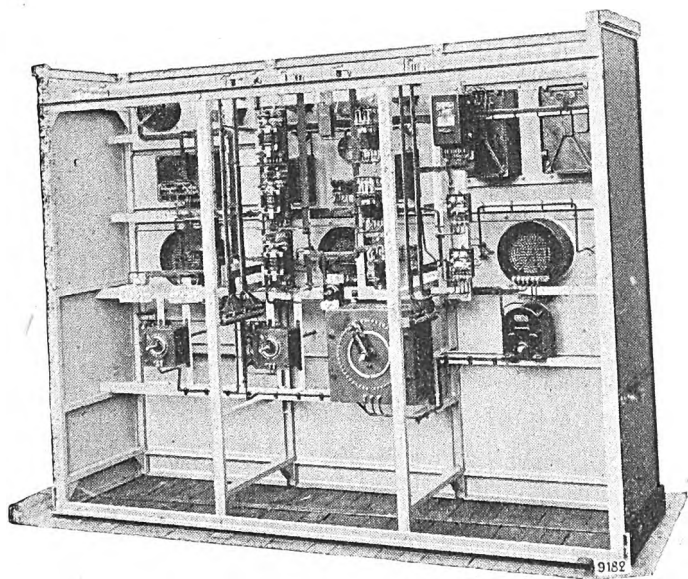


Fig. 21. — Vue arrière du tableau de la Centrale de Yokawa.

mètre, en particulier l'entraînement de la pompe à huile qui est nécessaire pour la fourniture du régulateur. La protection est assurée par les relais à retour, thermostats, relais de tension effectuant le blocage et agissant sur des relais à volets indicateurs. Il est prévu sur le régulateur des dispositifs à contacts à action différée provoquant la mise en route ou l'arrêt de l'une ou l'autre unité selon le débit dont on dispose ; en outre, des relais d'échauffement, montés en parallèle avec ces dispositifs, viennent doubler ces contacts.

Nous citerons encore, à cause de la puissance installée, la Centrale de Schlappin, près de Coire (Suisse), qui comprend une unité synchrone de 7 500 kVA, 600 t. m, 4 400 V, démarrant par la turbine.

V. — Comparaisons financières

Si l'on admet que la surveillance d'une centrale nécessite au moins trois personnes dont les salaires annuels atteignent au moins 30 000 francs, compte non tenu des frais supplémentaires qu'entraîne leur présence, tels que logement qu'il est absolument obligatoire de leur

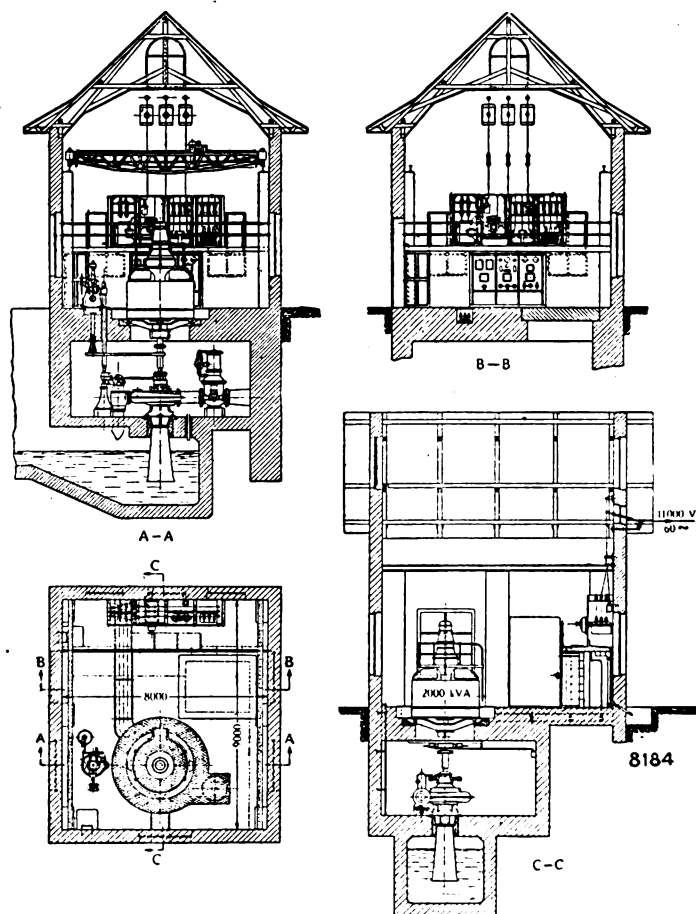


Fig. 22. — Plan de la Centrale de Yokawa.

assurer dans certaines régions isolées ou augmentation des bâtiments proprement dits de l'usine, du fait de ce même personnel ; ces frais accessoires peuvent s'évaluer à un minimum de 5 000 francs par an, la dépense « Personnel » s'élève à 35 000 f., ceci en nous plaçant dans les conditions les plus économiques. Si donc, nous réalisons du fait de la marche automate une dépense supplémentaire et nous insistons

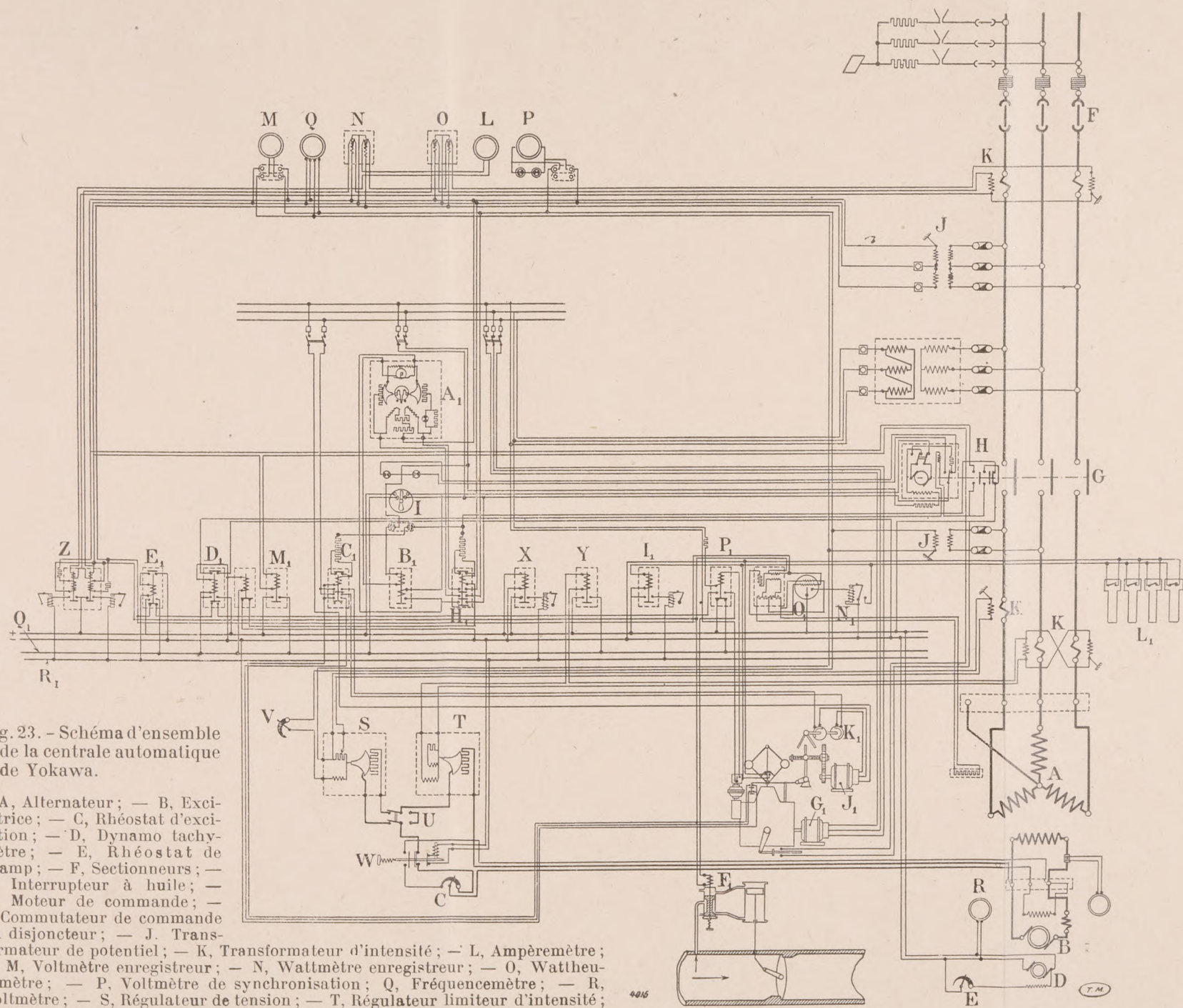


Fig. 23. - Schéma d'ensemble de la centrale automatique de Yokawa.

A, Alternateur; — B, Excitatrice; — C, Rhéostat d'excitation; — D, Dynamo tachymètre; — E, Rhéostat de champ; — F, Sectionneurs; — G, Interrupteur à huile; — H, Moteur de commande; — I, Commutateur de commande du disjoncteur; — J, Transformateur de potentiel; — K, Transformateur d'intensité; — L, Ampèremètre; — M, Voltmètre enregistreur; — N, Wattmètre enregistreur; — O, Wattheur-mètre; — P, Voltmètre de synchronisation; Q, Fréquencemètre; — R, Voltmètre; — S, Régulateur de tension; — T, Régulateur limiteur d'intensité; — U, Commutateur; — V, Rhéostat de mise au point; — W, Commutateur de désamorçage; — X, Relais à maximum de tension; — Y, Relais à maximum d'intensité; — Z, Relais à retour d'énergie; — A₁, Appareil de synchronisation automatique; — B₁, Relais intermédiaire; — C₁, Relais inverseur; — D₁, Relais d'arrêt sans verrouillage; — E₁, Relais d'arrêt avec verrouillage; — F₁, Electro aimant du servo-moteur de la vanne; — G₁, Moteur de la pompe à huile du régulateur; — H₁, Relais d'enclenchement de l'appareil de mise en parallèle; — I₁, Relais intermédiaire d'échauffement; — J₁, Moteur du variateur de vitesse; — K₁, Contacts fin de course; — L₁, Thermomètre à contact; — M₁, Relais à temps; — N₁, Voyants; — O₁, Indicateur de température; P₁, Relais de pression d'huile; — Q₁, Barre de déclenchement sans verrouillage; — R₁, Barre de déclenchement avec verrouillage

sur le mot supplémentaire de l'ordre de 100 000 francs, représentant une annuité de 12 000 francs, compte tenu de l'amortissement, nous économiserons annuellement une somme de 23 000 francs, or ce chiffre de 100 000 francs est très large surtout pour une seule machine.

Nous citerons, à ce sujet, un exemple concret des avantages pécuniaires de la solution automate, celui de la Centrale de Hofen.

Les frais se sont élevés aux valeurs suivantes données en francs suisses :

Agrandissement du bâtiment	8 600
Appareillage et travaux hydrauliques	28 400
	37 000

A noter que les frais sont ici assez élevés, en particulier du fait de la signalisation du niveau de l'eau dans le réservoir situé à une distance verticale de 73 m et comprennent les régulateurs de tension et d'intensité.

Les charges annuelles correspondantes se décomposent ainsi :

Intérêts à 5,75 pour cent	2 127
Amortissement 1,5 pour cent pour le bâtiment	129
Amortissement 10 pour cent pour l'appareillage	2 840
	5 096

Les économies annuelles correspondent :

1° A la réduction des salaires, le coût du contrôle périodique de l'installation peut être évalué à un demi-salaire environ, alors qu'il était nécessaire d'avoir auparavant deux hommes se remplaçant :

2° A une meilleure utilisation de l'eau pendant la nuit ou par les périodes pluvieuses ; on peut ainsi récupérer environ 40 000 kWh par an pour une unité de 400 kVA, soit au total :

Salaires	7 500
40 000 kWh, à 0,05	2 000
	9 500

L'économie annuelle est donc d'environ 4 400 francs suisses.

Les chiffres indiqués ici, tant pour les dépenses annuelles que pour les bénéfices, sont, si on les convertit en francs français, notablement supérieurs à ceux donnés précédemment, mais ceci tient uniquement aux conditions économiques différentes des deux pays, et en tout cas,

ils conduisent à une durée du même ordre pour l'extinction des dépenses engagées.

Nous sommes très heureux de remercier la Société Française des Electriciens qui a bien voulu nous assurer son patronage, ce qui nous a permis de vous rappeler les quelques idées dont il faut s'inspirer, lors de l'étude d'installations automates, et de vous montrer l'intérêt qu'ont les exploitants, à ne pas oublier d'envisager la solution automate toutes les fois qu'ils auront une installation nouvelle à équiper, de vous montrer également qu'ils n'ont pas lieu de craindre à priori soit un manque de sécurité de fonctionnement, soit une dépense non rentable.

Nous espérons que le développement des centrales automates, pour lesquelles l'étranger nous a montré la voie, va continuer à se poursuivre en France, car il permettra un emploi meilleur et plus étendu de nos richesses hydrauliques, dont nous avons tout intérêt à intensifier l'utilisation.

QUELQUES PARTICULARITÉS DES REDRESSEURS MODERNES ⁽¹⁾

par M. ROY

Ingénieur à la Société Siemens-France.

L'auteur du présent article résume quelques-uns des principaux passages d'un film qui a été présenté à la Société Française des Electriciens.

L'article a trait à quelques caractéristiques des redresseurs modernes, et décrit particulièrement les dispositions prises pour éviter la production des court-circuits internes.

Il est limité à la description des ampoules de verre et aux cuves des redresseurs métalliques ainsi qu'à leurs accessoires.

Après une longue période de mise au point, la technique des convertisseurs à vapeur de mercure a progressé dans une telle mesure que depuis plusieurs années, on n'hésite plus à employer ces appareils pour des services qui doivent être assurés avec une sécurité complète, par exemple, pour des services publics. L'auteur a pensé qu'il pouvait être intéressant de montrer quelques dispositions caractéristiques des redresseurs modernes, ampoules de verre ou redresseurs métalliques, ainsi que les opérations essentielles de la fabrication de ces appareils.

Un film cinématographique, dont les vues ont été prises dans les ateliers des Etablissements Siemens Schukert a été présenté au cours de la réunion mensuelle de la Société Française des Electriciens ⁽¹⁾. Nous décrirons seulement dans ces pages quelques-uns des sujets représentés par le film, en commençant par les redresseurs à ampoules de verre, et en terminant par les redresseurs à grand débit.

REDRESSEURS EN VERRE

Le constructeur des ampoules de verre doit prendre toutes les dispositions pour empêcher la production des court-circuits internes. La pression de la vapeur de mercure doit être jusqu'aux régions de surcharges garanties, limitée en fonction de la tension redressée ; ce résultat est obtenu par une forme appropriée de la chambre de conden-

(1) Communication présentée à la séance publique du 4 janvier 1930.

sation et par une ventilation artificielle. Il faut encore soigneusement éviter la formation de remous de vapeur sur le trajet de l'arc et au voisinage des anodes. C'est pourquoi, pour les tensions de l'ordre de 500 V, on dispose les bras porte-anodes en forme de lignes brisées à angle vif, afin d'arrêter la projection de vapeur pouvant émaner du corps de l'ampoule. On a complété l'efficacité de cette dernière disposition en prolongeant la partie inférieure des bras comme cela est

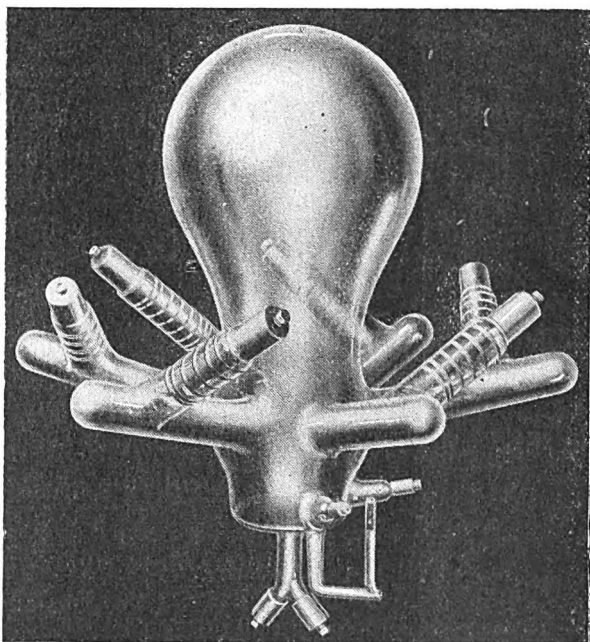


Fig. 1. — Ampoule kexaphasée à allumage par jet 350 A 600 V.

visible sur la figure 1. Le flux de vapeur venant de l'ampoule se dirige dans le fond de tube inférieur où il est condensé.

Les allumages en retour sont les seuls accidents électriques graves dont la suppression s'impose au constructeur. Mais il pourrait se produire encore, par temps froid, des difficultés d'allumage, ou de l'instabilité de l'arc aux faibles charges ; on remédie à cet inconvénient en modifiant d'une façon appropriée le potentiel le long des bras d'anode. A cette fin, des gâines statiques métalliques sont enroulées à la partie supérieure de chaque bras ; une gâine est reliée électriquement au conducteur de l'anode correspondante.

Enfin, l'allumage des ampoules a été perfectionné. L'ampoule représentée par la fig. 1 porte le dispositif d'allumage par jet. Un tube en U, fixé dans la région cathodique et rempli de mercure, porte, dans la branche intérieure, une tuyère dirigée vers le haut, et dans son bras extérieur un flotteur en fer. Au moment de l'allumage, une bobine coaxiale au bras extérieur, attire vers le bas le noyau qui refoule le mercure ; celui-ci jaillit de la tuyère et frappe une des anodes d'entretien préalablement mise sous tension ; aux interruptions de la veine de mercure, prennent naissance des étincelles qui allument l'arc. Un appareillage très simple de relais ou de boutons-poussoirs, permet d'adapter ce système, soit à la commande à la main, soit à la commande automatique. Ce système a été appliqué à toutes les ampoules, de forte et de faible intensité, car il s'est révélé absolument sûr et permet de supprimer l'allumage par basculage dont la manœuvre peut être parfois brutale.

En même temps que les organes des ampoules évoluaient vers leur disposition actuelle, la fabrication progressait. Le choix des matériaux (en particulier pour les introductions de courant) est maintenant éprouvé ; l'équipement des ateliers s'est perfectionné et comprend des supports orientables, des tours, etc., qui dispensent les ouvriers d'une manipulation pénible et dans une certaine mesure du soufflage et qui leur permettent d'exécuter tout travail avec précision.

REDRESSEURS MÉTALLIQUES

Une des conditions de la sécurité du fonctionnement des redresseurs métalliques mentionnée déjà à propos des ampoules de verre, est la condensation rapide de l'excès de la vapeur neutre émise par la cathode, avant qu'elle ne puisse atteindre la zone des anodes. C'est pourquoi certains constructeurs ont disposé à l'intérieur même de la cuve un réfrigérant, à circulation d'eau. La figure 2 représente un plateau de cuve portant les anodes, leurs protecteurs et le réfrigérant interne visible au centre. Celui-ci est constitué par deux enveloppes cylindriques coaxiales, parcourues par une circulation d'eau et suspendues au-dessus de la cathode. Le jet de vapeur émis par la tache cathodique pénètre dans les cylindres et s'y condense en partie ; le reste s'échappe par le haut, puis descend entre les surfaces réfrigérantes internes et les surfaces réfrigérantes externes, où il se condense presque totalement avant de parvenir aux orifices des anodes.

On recule la limite des surcharges à partir desquelles se produisent les allumages en retour, par l'emploi de surfaces dites de neutralisation, disposées dans les protecteurs, sur le trajet de l'arc, devant les anodes. Après chaque extinction périodique d'un arc d'anode, la recombinaison des porteurs de charge de la vapeur ionisée n'est pas instantanée, surtout si les mouvements de ceux-ci sont gênés par la présence de vapeur neutre. Lorsque l'anode devient négative, les élec-

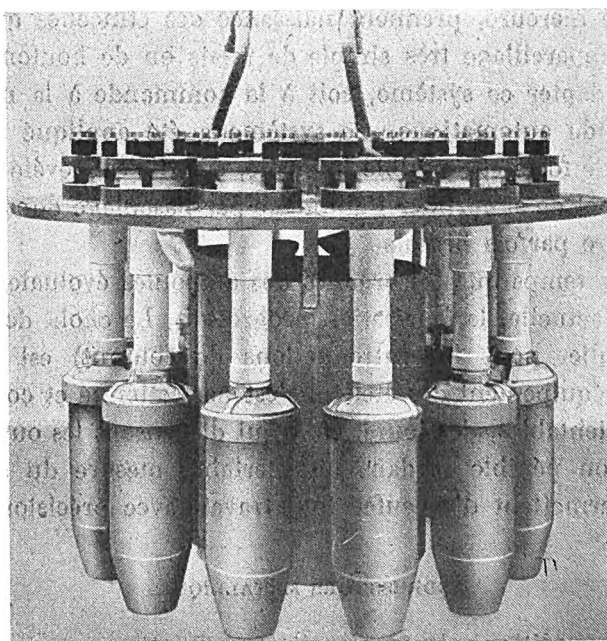


Fig. 2. — Plateau de cuivre et accessoires d'un redresseur métallique.

trons encore libres s'éloignent sous l'action du champ électrique pendant que les ions sont attirés par l'anode et forment autour d'elle une gaine positive. Entre cette gaine et l'anode, peut prendre naissance une différence de potentiel qui peut, à son tour, pour certaines pressions de la vapeur, causer la formation d'effluves et créer ainsi un risque d'allumage en retour. L'observation a été faite, et se trouve maintenant établie, suivant laquelle la présence de surfaces métalliques au sein d'une vapeur ionisée active considérablement la recombinaison des porteurs de charges ; on l'a mise à profit depuis plusieurs années déjà, en disposant au voisinage des anodes les surfaces de

neutralisation nommées plus haut. Ces surfaces ramènent à une très faible épaisseur la gaine positive et réduisent dans la même mesure l'importance du courant de retour normal. L'efficacité de ces gaines est particulièrement précieuse dans le cas des redresseurs à très forte intensité qui sont équipés avec des protecteurs de grand diamètre.

Les dispositions précédentes ont pour objet d'agir sur la pression et sur l'état électrique de la vapeur de mercure. Les anodes elles-mêmes ont été étudiées afin de les doter de formes et de modes de refroidissements adéquats. Le souci d'accroître encore la sécurité à l'égard des allumages en retour a conduit certains constructeurs à mettre au point et à employer des anodes en graphite. Les anodes des redresseurs figurés ci-contre appartiennent à ce type. Le graphite présente l'avantage d'avoir un rayonnement thermique maximum et, à une température donnée un pouvoir émissif plus faible que les métaux. Il en résulte qu'une surcharge accidentelle occasionnera, dans le cas de l'emploi du graphite, une élévation de température et un danger de court-circuit moindres. Il a été, en outre, remarqué que les court-circuits internes sont, avec les redresseurs à anodes en graphite moins brutaux et comme amortis.

Signalons enfin les joints en caoutchouc, qui équipent les redresseurs figurés dans ces pages. Une tige porte-anode est terminée à sa partie supérieure par une bride ; entre cette bride et l'isolateur de porcelaine d'une part et entre l'isolateur et le plateau de cuve d'autre part, sont intercalés des anneaux de caoutchouc. Un choix judicieux de la composition du caoutchouc a permis d'obtenir un corps stable et conservant ses propriétés mécaniques au-delà d'une température permanente de 70°C (1). Ce type de joint a l'avantage d'être, comme les autres, parfaitement étanche, d'être très facile à monter et de nécessiter seulement des efforts de serrage modérés ; en outre, le caoutchouc absorbe les dilatations thermiques et permet la suppression des ressorts compensateurs.

ACCESSOIRES

La disposition des appareils accessoires pour l'entretien de l'arc et le pompage des gaz a été simplifiée. Sur les appareils figurés, l'allumage et l'entretien se font en courant continu ; la tige d'allumage

(1) Des cuves de redresseurs équipés avec de tels joints ont été récemment démontées après un service de plus de 2 ans. Au remontage on a utilisé les joints du début.

sert d'anode d'entretien ; il n'y a plus sur le redresseur qu'une seule introduction auxiliaire de courant. Le courant est fourni par un petit poste à ampoule de verre placé derrière le tableau de service.

Les canalisations de vide sont entièrement montées sur les redresseurs, afin d'éviter l'installation de tubes et joints étanches sur les lieux d'utilisation. Les tuyauteries sont courtes pour réduire au minimum les pertes de charge. On voit sur la fig. 3 l'appareil électrique

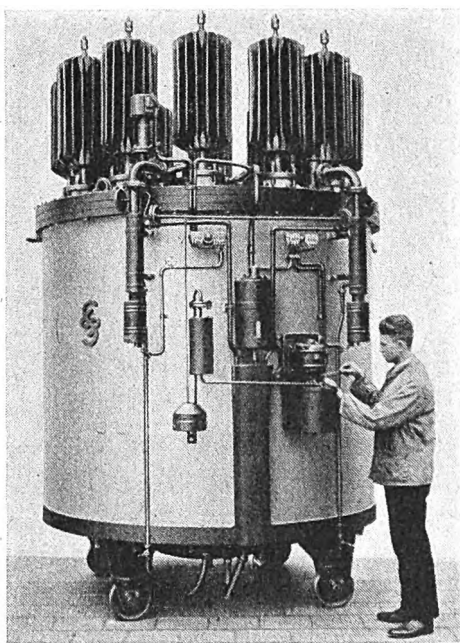


Fig. 3. — Redresseur à grand débit 600 A à 800 V.

pour la mesure de vide, les pompes à vapeur de mercure, la soupape barométrique de vide, assurant automatiquement avec une sécurité complète l'isolement du redresseur à l'arrêt de la pompe rotative ; la pompe rotative à palettes tournant dans le vide, sans bruit, et qui est entraînée directement par un moteur à 1 500 tours.

On voit encore, à la partie antérieure, le corps cylindrique d'une vanne commandée par thermostat ayant pour rôle de régler le débit de l'eau de refroidissement et de maintenir le redresseur à une température optima, quelle que soit la charge.

*
**

Les organes des redresseurs sont maintenant adaptés aux conditions physiques dans lesquelles ils doivent travailler ; une expérience étendue et s'appliquant à plusieurs années montre qu'on est parvenu à leur détermination correcte.

Les procédés de fabrication ont eux aussi gagné en sûreté. L'emploi de la tôle de fer parfaitement homogène et les progrès des procédés de la soudure autogène ont réduit à peu de choses les aléas en atelier.

Discussions

M. LEBAPIN. — Je veux, en premier lieu, féliciter le Conférencier sur la présentation de son film et sur les dispositifs ingénieux réalisés dans ses appareils.

Mais comme il n'y a pas d'appareils parfaits, je voudrais faire quelques objections sur certaines parties que je considère comme des points faibles.

Les joints en caoutchouc semblent présenter de graves inconvénients. Le caoutchouc, ou plus exactement la matière plastique, renfermant du caoutchouc, est sujette à des modifications qui se produisent, d'ailleurs, à des températures relativement basses, comme l'a montré l'étude récente des câbles en caoutchouc. Il est donc à craindre que des fuites se produisent. Mais quelque chose de plus grave résulte du fait qu'on ne peut déceler facilement l'endroit où une fuite s'est déclarée, de sorte que le démontage de l'appareil devient nécessaire. C'est une opération longue, coûteuse et qui demande beaucoup de précautions. Cet inconvénient n'existe pas dans le cas du joint à mercure.

Bien que le Conférencier ait indiqué précédemment que la matière plastique a été étudiée pour éviter les inconvénients que nous signalons, les objections formulées n'en subsistent pas moins.

J'ai relevé que la température de l'appareil était de 40°C, température plutôt faible et qui explique précisément le luxe de précautions prises pour le refroidissement. Or, il a été fait des essais sur la température la plus favorable pour le bon fonctionnement des Redresseurs, et on a trouvé que cette température devait être comprise, je crois me rappeler, entre 60 et 80°C. C'est un écart assez grand avec le chiffre précédent. Il est facile de concevoir qu'il y a une certaine

température qui, lors du bombardement des éléments neutres par les électrons émis par la cathode, favorise l'expulsion des électrons des dits éléments, tandis que les ions positifs viennent augmenter la tache cathodique. Cela revient alors à dire que l'espace entre les électrodes devient plus conducteur. Dans les appareils présentés la conductibilité est donc moins bonne.

Enfin, il est difficile d'enlever les gaz occlus dans les anodes en graphite, et il est à peu près impossible d'éviter que des parcelles de matière ne se détachent et ne viennent encrasser l'appareil, ce qui doit conduire fatalement à un incident de fonctionnement. N'est-ce pas justement une des raisons qui, jointe à la nature du joint en caoutchouc, conduise au démontage et au nettoyage des appareils tous les trois ans, comme on nous l'a indiqué. C'est une opération qui n'est pas recommandable et que les exploitants ne désirent certainement pas répéter trop fréquemment. Je connais bien un appareil qui, depuis de longues années, fonctionne dans des conditions assez dures et n'a jamais subi de démontages.

En ce qui concerne le choix des anodes en graphite, le conférencier nous a dit qu'il avait été fait après des essais nombreux. Or il est curieux de constater que dans d'autres appareils, après des études également longues, on avait finalement abandonné le graphite pour utiliser le fer.

On sait, d'autre part, que les anodes en graphite sont généralement employées dans les redresseurs en verre ; mais il faut précisément observer que la durée de ces derniers appareils est fort limitée.

Je terminerai en indiquant que je ne vois pas bien l'avantage de l'allumage par courant continu aux lieu et place du courant alternatif. Cela nécessite un petit redresseur en verre qui possède une vie peu longue, alors que l'alternatif est si simple et si sûr. Peut-être a-t-on eu en vue une économie résultant du passage du même courant dans les plaques de chauffage et dans l'anode d'allumage. C'est là une économie qui me semble insignifiante — et même très probablement apparente — en regard de la puissance du redresseur.

En dernier lieu, il faut noter que la basse température de fonctionnement de ces Redresseurs conduit à une consommation d'eau qui doit augmenter, d'une façon appréciable, le prix de revient du courant transformé.

M. DARRIEUS. — L'avantage revendiqué en faveur des anodes en graphite de présenter, en tant que corps noir, une radiation plus forte que les métaux polis, ne nous paraît pas devoir entrer pratiquement en ligne de compte, car il est aisé de s'assurer que, même à la température du rouge sombre, la perte de chaleur par radiation demeure incomparablement plus faible que celle par conductibilité. Une pièce de fer peut ainsi conserver plusieurs minutes la haute température nécessaire pour la forge, tandis que, plongée dans l'eau, elle se refroidit presque instantanément par conductibilité.

M. GIROZ. — La conductibilité du graphite est très suffisante étant donné la température de régime à laquelle est appelée à fonctionner l'anode. D'ailleurs le refroidissement de l'anode s'effectue plutôt par rayonnement que par conductibilité et le refroidissement par rayonnement du graphite est supérieur à celui du fer aux températures de régime usuelles des anodes.

Enfin, contrairement à la remarque de M. Lebaupin, il semble qu'il soit plus difficile de dégager les gaz occlus dans les anodes en fer que dans les anodes en graphite.

M. DARRIEUS. — La constatation de la préférence générale donnée, comme résultat d'une expérience déjà longue, aux anodes en graphite pour les petits redresseurs en verre, et au contraire aux anodes en fer pour les redresseurs industriels de grande puissance, illustre plutôt les considérations ci-dessus, car un raisonnement très simple permet de déduire que, pour deux anodes géométriquement semblables, l'égalité de la proportion entre les pertes de chaleur par radiation et par conductibilité, à la même température de fonctionnement, ne peut être assurée que si la conductibilité de la substance de l'anode croît proportionnellement aux dimensions homologues.

M. ROY. — Je remercie M. Lebaupin d'avoir établi une comparaison précise entre ce type d'appareil et le redresseur qu'il utilise depuis plusieurs années pour ses services. Je vais examiner ses objections et revenir sur certains détails des dispositifs critiqués ; j'espère ainsi lever toute incertitude au sujet de leurs propriétés et justifier leur adoption qui a été acquise après une expérience favorable d'exploitation, en services privés et publics, étendue sur de nombreuses années.

I. — JOINTS EN CAOUTCHOUC

a) Le caoutchouc des joints s'altère-t-il à la longue, sous l'action de la température, compromettant ainsi l'étanchéité du redresseur ?

b) N'est-il pas nécessaire de refroidir énergiquement les joints, su-jétion qui impose une circulation d'eau très active et un refroidissement excessif de l'ensemble du redresseur.

c) Comment repérer un joint non étanché ?

1) Par des recherches et des essais minutieux, on a procédé au choix d'un caoutchouc qui est stable et conserve indéfiniment ses propriétés mécaniques sous la température de 70°C. La température peut être élevée sans inconvénients pendant quelques instants à 80°C. En outre par un dégazage préalable sous le vide, on extrait du caoutchouc, la plus grande partie des gaz occlus. Les joints en caoutchouc équipent actuellement plus de cinq cents redresseurs, ils sont employés depuis 8 ans et ne donnent lieu à aucun mécompte. Après démontage de cuves ayant fonctionné plus de trois ans en service effectif, on a, lors du remontage, employé à nouveau les joints du début.

2) Les températures ci-dessus indiquées comme admissibles pour les joints, laissent une marge très large pour le réglage de la circulation d'eau de refroidissement. Comme il a déjà été dit, au cours de la communication, cette température est réglée de façon à ce que le redresseur fonctionne au voisinage du point le plus favorable de la caractéristique de l'arc. La température de l'eau de sortie correspondante dépend des dimensions des organes du redresseur et varie évidemment suivant les constructeurs.

3) Les joints au mercure permettent de repérer rapidement par simple inspection de niveau du mercure dans les tubes de remplissage des joints, quel est le joint défectueux. Avec des joints en caoutchouc, ce repérage se fait en serrant successivement les joints ; en effet, dès que le serrage du joint non étanche est augmenté, la fuite de celui-ci s'élimine et l'amélioration de vide est aussitôt révélée par le vacummètre. Le serrage peut être très rapide, car chaque joint d'anode est tenu par 4 écrous seulement ; quelques minutes suffisent à cette recherche.

Il y a lieu de remarquer, outre la grande simplicité du montage des joints en caoutchouc, leur propriété suivante : ils sont élastiques et ne nécessitent que des efforts de serrage très modérés ; ils compen-

sont eux-mêmes les dilatations thermiques qui se produisent en charge; ils présentent un minimum de risques de rupture de porcelaine.

II. — ANODES EN GRAPHITE

a) Le graphite des anodes ne se volatilise-t-il pas en se déposant sur les parois du redresseur ?

b) Le graphite ne produit-il pas pendant longtemps des dégagements de gaz occlus ?

1) Le graphite servant à faire les anodes est obtenu, par traitement à très haute température, à l'état de pureté quasi absolue. Il ne se sublime qu'à très haute température. Aux températures de fonctionnement des anodes, les dépôts de graphite sont plutôt moins importants que les dépôts de fer. Des essais comparatifs entre la tenue des deux matériaux ont été faits sur des redresseurs équipés avec protecteurs en quartz ; après un service suffisamment long, on a mesuré la conductibilité des dépôts à l'intérieur des protecteurs ; les dépôts métalliques étaient plus conducteurs que les dépôts de carbone. Il faut en outre signaler que le dépôt de carbone sur le mercure n'a aucun inconvénient, tandis que le dépôt de fer extrêmement divisé se combine au mercure en formant une sorte d'amalgame qui provoque des encrassements.

2) Les anodes en graphite ne donnent lieu, après formation (sensiblement de même durée que celle des anodes métalliques) à aucun dégagement. Il suffit de rappeler que les ampoules de verre, qui sont complètement closes, sont équipées avec des anodes en graphite et fonctionnent ainsi pendant des années.

Le type de redresseur présenté était autrefois équipé avec anodes métalliques. Il y a 4 ans on a commencé à employer les anodes en graphite et, en raison des bons résultats acquis, on n'utilise plus aujourd'hui que ce matériau. Il y a lieu de faire remarquer de plus que la substitution des anodes en graphite aux anodes métalliques a permis d'augmenter notablement la charge des différents types de cuves.

III. — ALLUMAGE ET ENTRETIEN DE L'ARC EN COURANT CONTINU

Le système d'allumage nécessitant l'emploi d'un redresseur auxiliaire, ne complique-t-il pas l'installation ? L'emploi du courant continu pour l'entretien de l'arc permet de réduire à une seule les anodes auxiliaires et d'utiliser, comme anode d'entretien, l'anode d'allumage elle-même. On réduit ainsi le nombre des entrées de courant qui sont

les organes de moindre résistance d'un redresseur ; l'anode d'allumage restante peut être largement dimensionnée et très robuste. La construction de la cuve est donc simplifiée. Le petit poste redresseur fournissant le courant continu n'est guère plus volumineux que le transformateur utilisé pour l'allumage et l'entretien en courant alternatif ; la mise en route est presque automatique et se réduit à la fermeture de l'interrupteur d'alimentation du poste auxiliaire, comme on fermerait celui du transformateur d'allumage et d'entretien ; la durée de l'allumage, depuis la fermeture de cet interrupteur auxiliaire est inférieure à une seconde. En résumé, les accessoires ne sont pas plus compliqués, la construction du redresseur est simplifiée. Aucun accident n'est à craindre, qui serait causé par l'ampoule de verre ; celle-ci est d'un petit modèle (15 A/75 V) et sa durée est de 14 000 heures environ ; et même si une fissure intempestive se produit, il suffit de remplacer l'ampoule, sans qu'il y ait lieu pour cela d'arrêter le redresseur.

Rappelons enfin qu'une fois l'allumage effectué, le courant d'entretien est stabilisé par la résistance qui sert au chauffage de la pompe à vapeur de mercure ; grâce à ce montage particulier, les pertes dans les appareils auxiliaires, déjà faibles par elles-mêmes sont réduites au minimum.

IV. — La fréquence des visites et nettoyages internes des redresseurs, qui serait de une fois tous les 3 ans, suivant la communication, semble élevée.

Ces nettoyages ne sont pas nécessités par la formation de dépôts, sur les isolateurs en particulier, de la matière des anodes ; d'ailleurs comme nous l'avons exposé plus haut, l'emploi des anodes en graphite réduit l'importance des dépôts. Ainsi qu'il a été dit à la fin de la communication, il subsiste, malgré tous les soins, sur les surfaces internes du redresseur des impuretés qui finissent par produire des encrassements.

Il est bien certain que les temps de service à partir desquels les encrassements deviennent gênants, sont extrêmement variables et qu'on peut citer des redresseurs fonctionnant depuis plus de 5 ans sans avoir été ouverts. La fréquence indiquée est telle, qu'elle n'est pas dépassée pour un redresseur correctement construit.

J'espère avoir, par ces explications, résolu les difficultés relevées, par M. Lebaupin.

UN NOUVEAU DISPOSITIF DE MESURES EN COURANT ALTERNATIF MUSICAL : LE POTENTIOMÈTRE-PHASEMÈTRE APPLICATIONS A LA PHONOMÉTRIE ⁽¹⁾

par M. NANDILLON

Lieutenant de Vaisseau.

I. — Généralités sur les vibrations entretenues

Le potentiomètre-phasemètre est un dispositif destiné à l'étude des vibrations entretenues que l'on rencontre en électricité, en mécanique et en acoustique.

On sait que les phénomènes vibratoires entretenus peuvent être étudiés d'une manière très simple en utilisant les propriétés des quantités complexes. Celles-ci permettent de représenter algébriquement les vecteurs coplanaires.

D'une manière générale, dans tout phénomène vibratoire entretenu la cause et l'effet peuvent être représentés respectivement par un vecteur. Ces deux vecteurs ne sont pas indépendants l'un de l'autre et sont définis par une relation de la forme :

$$\frac{\text{vecteur cause}}{\text{vecteur effet}} = W \quad (1)$$

où W est lui-même un vecteur.

Il suffit de connaître la fonction qui relie W à toutes les variables dont dépend le phénomène vibratoire pour pouvoir doser avec précision la valeur de l'effet par rapport à la cause qui le produit.

Voici quelques exemples de la relation générale ⁽¹⁾ empruntés aux domaines électrique et mécanique.

Soit un circuit oscillant de self L , résistance R et capacité C , excité par la f. é. m. E de pulsation ω . Il apparaît dans ce circuit un courant I de pulsation ω et défini par la relation :

$$\frac{E}{I} = Z = R + j \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right). \quad (2)$$

(1) Communication présentée en séance publique de la Société Française des Electriciens le 1^{er} février 1930.

Le vecteur Z est l'impédance électrique. Considérons un système formé par une masse M suspendue à un support fixe par un ressort de rigidité longitudinale E . Si une force vibromotrice agit longitudinalement sur la masse M , celle-ci prend une amplitude vibratoire x .

Pour définir l'état vibratoire de la masse M prenons comme variable la vitesse pulsatoire

$$V = \omega x.$$

On a alors dans le cas général

$$\frac{F}{V} = g + j \left(M\omega - \frac{E}{\omega} \right) = S. \quad (3)$$

Dans cette relation g est une quantité telle que l'expression gV^2 représente l'énergie mécanique totale dissipée par le système, g a une signification analogue à celle de R , on l'appelle pour cette raison

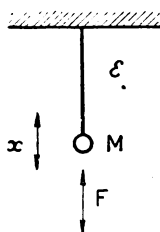


Figure 1.

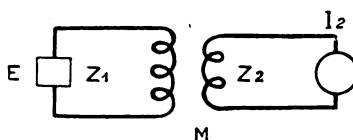


Figure 2.

résistance mécanique. De même le vecteur S , analogue au vecteur Z , s'appelle impédance mécanique. Considérons le système formé par deux circuits électriques couplés par induction mutuelle, une force électromotrice E , de pulsation ω , excite le circuit primaire. Le circuit secondaire est parcouru par un courant I_2 .

Si Z_1 et Z_2 désignent respectivement l'impédance simple primaire et secondaire et M le coefficient d'induction mutuelle on peut relier I_2 à E à l'aide de la relation :

$$\frac{E}{I_2} = \frac{Z_1 Z_2 + M^2 \omega^2}{-jM\omega} = Z'_2. \quad (4)$$

Le vecteur Z'_2 peut s'appeler *impédance apparente* du circuit secondaire. En généralisant, dans une chaîne de N circuits couplés, le courant I_n peut être relié à la force électromotrice primaire au moyen d'un vecteur Z'_n que nous dénommerons l'impédance apparente d'ordre n . La propriété fondamentale de Z'_n est de pouvoir présenter n

phénomènes de résonance. On peut imaginer et réaliser aisément deux vibreurs mécaniques simples couplés par inertie. Les équations de Lagrange appliquées au dispositif fournissent les équations du mouvement vibratoire. On peut relier la vitesse pulsatoire secondaire à la force vibromotrice primaire au moyen de l'équation.

$$\frac{F}{V_2} = \frac{S_1 S_2 + M^2 \omega^2}{-jM\omega} = S'_2 \quad (5)$$

Le vecteur S'_2 est analogue au vecteur Z'_2 . Pour cette raison on peut l'appeler *impédance mécanique apparente* du vibreur secondaire. On pourrait là encore définir un vecteur impédance mécanique apparente d'ordre n pouvant présenter jusqu'à n résonances.

Les phénomènes vibratoires dans les lignes électriques et dans les tuyaux sonores peuvent être également représentés par des équations de même forme. Dans les deux cas, on peut définir une impédance caractéristique fonction de l'impédance linéaire et de la perditance linéaire électrique ou mécanique.

Il existe donc une analogie très étroite entre l'aspect des phénomènes vibratoires entretenus électriques et mécaniques. Cette analogie se traduit par l'existence de vecteurs correspondants jouissant de propriétés semblables.

Pour compléter cette analogie on peut trouver des phénomènes dans lesquels un vecteur représentatif d'une grandeur électrique et un vecteur représentatif d'une grandeur mécanique combinent leurs effets et interviennent au même titre dans le résultat final.

C'est ce qui se produit dans un système transformateur d'énergie comme le téléphone électromagnétique. E désignant la f. é. m. alternative qui excite ce téléphone et V la vitesse pulsatoire du point central du diaphragme sonore de l'appareil, on peut relier V à E au moyen de la relation :

$$\frac{E}{V} = \frac{1}{c} (SZ + c^2) = \Sigma'_2 \quad (6)$$

dans laquelle : S est l'impédance mécanique du diaphragme rapportée au centre de ce dernier et Z l'impédance électrique du circuit excitant le téléphone, c est une fonction des constantes électromagnétiques du téléphone. On peut rapprocher le vecteur Σ'_2 des vecteurs Z'_2 et S'_2 rencontrés plus haut. Σ'_2 peut s'appeler l'*impédance électromagnétique* et c , le *coefficient de couplage électromécanique* du téléphone.

Ce très bref exposé montre donc que tout phénomène vibratoire entretenu conduit à l'étude de quantités vectorielles. Or, un vecteur étant une quantité dirigée ne peut être défini qu'en fonction de deux variables qui sont en quelque sorte ses coordonnées. On peut utiliser les coordonnées cartésiennes qui sont : la projection wattée a et la projection déwattée b de ce vecteur.

On a :

$$W = a + jb \quad (7)$$

On peut aussi bien utiliser les coordonnées polaires qui sont le module m , égale au segment de droite ow et l'argument ou phase φ qui est l'angle formé par le vecteur avec l'axe des quantités wattées. On a

$$W = m e^{j\varphi}.$$

Le second mode de définition d'un vecteur présente de multiples avantages :

Tout d'abord il rend en général les calculs plus simples et conserve au vecteur son individualité propre. Mais surtout, par la mise en évi-

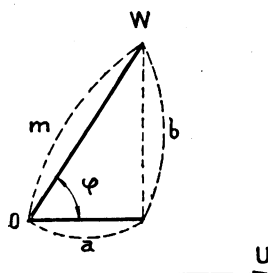


Figure 3.

dence de la phase, il permet le plus souvent de donner des phénomènes une interprétation physique, intéressante. Plusieurs auteurs ont cherché à étudier les phénomènes vibratoires sous leur aspect vectoriel et ont imaginé des dispositifs de mesure de la phase. Nous citerons en particulier les travaux remarquables de M. Blondel sur ce sujet.

Pour définir ou mesurer un vecteur donné W on peut utiliser un vecteur de référence U . Nous poserons alors que la mesure de W est le rapport $\frac{W}{U}$ or, en coordonnées polaires, on a :

$$\text{Module } \frac{W}{U} = \frac{\text{module } W}{\text{module } U} \quad (9)$$

$$\text{Phase } \frac{W}{U} = \text{phase } W - \text{phase } U. \quad (10)$$

Le propre du potentiomètre-phasemètre est précisément de rapporter la quantité à évaluer à un vecteur de référence, et de fournir deux relations analogues à (9) et (10).

II. — Description du Potentiomètre-Phasemètre

En fait, dans le potentiomètre-phasemètre le vecteur de référence et le vecteur inconnu sont toujours deux courants alternatifs de même période.

Mais comme il est possible de faire dépendre un courant électrique d'un phénomène vibratoire au moyen d'une transformation électromécanique comme celle qui s'opère dans le téléphone, le potenti-

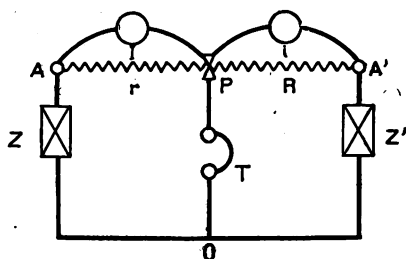


Figure 4.

mètre-phasemètre permet de rapporter un phénomène vibratoire à un courant électrique de même période. Il permet d'ailleurs vice versa de rapporter un courant électrique à un phénomène vibratoire de même période. Dans les deux cas on introduit dans les mesures un vecteur auxiliaire, qui est toujours un courant électrique, mais qui peut être éliminé soit à l'aide de la relation connue qui relie ce vecteur au vecteur à mesurer ou au vecteur de référence, soit, plus simplement, par une méthode de double pesée.

Le potentiomètre-phasemètre doit son nom à ce qu'il se compose d'un potentiomètre et d'un phasemètre montés en parallèle suivant le schéma de la figure 4. Le potentiomètre APA' ne comporte que de la résistance. Le phasemètre se compose de deux impédances conjuguées Z et Z' dont l'angle de phase est rendu variable. On sait que deux impédances conjuguées ont même module, et des phases égales, mais de signe opposé. On peut faire varier dans de larges limites l'an-

gle de phase des impédances Z et Z' . Dans ces conditions, on règle le potentiomètre et le phasemètre de manière à annuler le courant qui traverse le pont OP dans lequel est intercalé un détecteur de courant : (téléphone par exemple).

On a alors les relations suivantes :

$$\text{Module } \frac{I}{i} = \frac{R}{r} \quad (11)$$

$$\text{Phase } \frac{I}{i} = \text{phase } Z - \text{phase } Z' = \pm 2\alpha \quad (12)$$

α désigne la valeur absolue commune des angles de phase respectifs des impédances Z et Z' . Le signe $\pm$ est le signe de la réactance

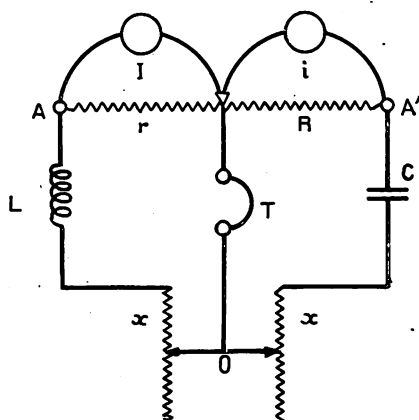


Figure 5.

de l'impédance Z , c'est-à-dire celle qui est directement connectée au point A.

En fait les relations (11) et (12) ne sont qu'approximatives, nous verrons plus loin comment il faut compléter l'appareil pour avoir des relations rigoureuses.

L'une des impédances Z et Z' est une self-induction, l'autre impédance est une capacité. Cette self-induction et cette capacité sont accordées à la fréquence du phénomène étudié. On fait varier l'angle de phase de ces impédances au moyen d'un rhéostat double qui introduit dans le circuit de chaque impédance une résistance réglable x (fig. 5).

Un second potentiomètre, non représenté sur la figure, compense les résistances potentiométriques r et R qui généralement sont inéga-

les. Il introduit pour cela une résistance R dans la branche OA du phasemètre et une résistance r dans la branche OA' .

Si l'on pose $r + R = \rho$,
on a rigoureusement :

$$x = \arctan \frac{L\omega}{\rho + x} \quad (13)$$

On peut représenter sur un graphique le mode de détermination de la phase $\Delta\varphi$ du vecteur $\frac{I}{i}$.

Le cercle de la figure 6 permet de définir les phases à partir d'un point origine O jusqu'à $\pm \pi$.

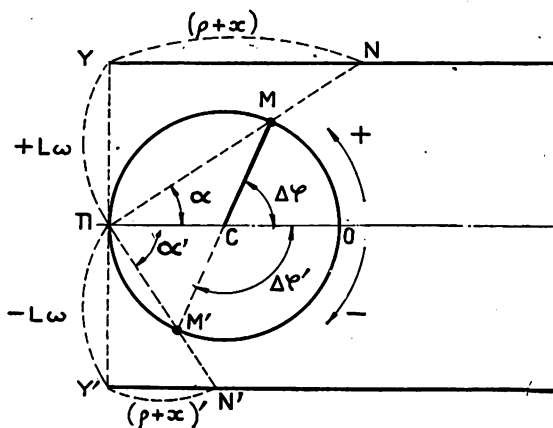


Figure 6.

Soit M un point courant du cercle correspondant à l'angle de phase $\Delta\varphi$. Il est évident que l'angle $O\pi M$ est égal à φ , c'est-à-dire à la moitié de la valeur absolue de $\Delta\varphi$.

Or pour définir l'angle α , portons sur l'axe YY' une longueur égale à $L\omega$. Suivant le signe de $\Delta\varphi$, on obtient le point Y ou le point Y' . Portons normalement à YY' une longueur égale à $(\rho+x)$. On obtient ainsi le point N . En joignant πN on obtient le point M et par suite $\Delta\varphi$ et α .

On voit que si $\Delta\varphi$ est inférieur en valeur absolue à $\frac{\pi}{2}$, α est inférieur à $\frac{\pi}{4}$ et $(\rho+x)$ est supérieur à $L\omega$. Plus $\Delta\varphi$ est petit en valeur absolue, plus $(\rho+x)$ est grand. L'impédance de chacune des branches self et capacité du phasemètre peut donc atteindre des valeurs considérables,

ce qui limiterait beaucoup la sensibilité du dispositif. Pour tourner la difficulté, renversons le sens des connexions du courant de référence, ce qui revient à ajouter $\pm\pi$ à l'angle de phase $\Delta\varphi$. On définit ainsi le point M' diamétralement opposé à M . Or au point M' correspondent l'angle α' qui est le complément de α et la résistance $(q+x)$ qui est inférieure à $L\omega$.

On peut donc par ce moyen, en faisant varier l'impédance du phase-mètre entre deux limites proportionnelles aux valeurs 1 et $\sqrt{2}$, dé-

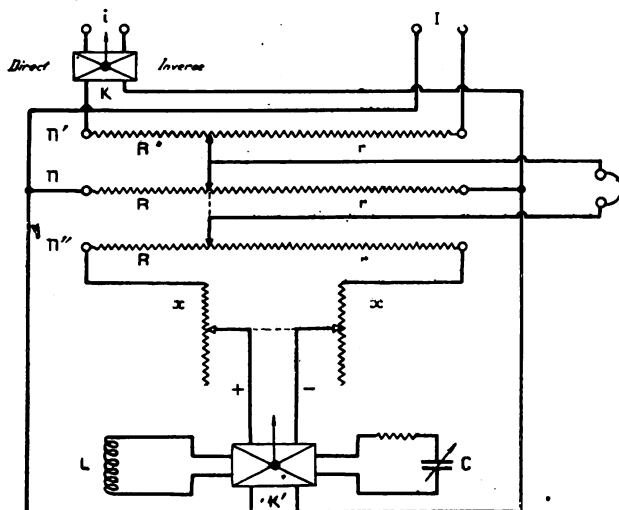


Figure 7.

crire entièrement le cercle des phases et conserver au dispositif une sensibilité constante.

Le schéma complet du potentiomètre-phasemètre est celui de la figure 7 :

Sur cette figure π est le potentiomètre proprement dit, π'' est le potentiomètre de compensation du phasemètre, π' est le potentiomètre supplémentaire dont l'objet est de rendre constamment égales à q les résistances respectives des circuits d'entrée du potentiomètre-phasemètre (circuits des courants I et i).

En fait la valeur de l'angle α est donnée par la formule :

$$\alpha = \arctg \frac{L\omega}{\rho + x_0 + x} \quad (14)$$

Il en résulte que α a une limite supérieure définie par l'égalité

$$\alpha_0 = \arctg \frac{L\omega}{\rho + x_0} \quad (15)$$

La phase cesse donc d'être mesurable si le rayon du point figuratif M est compris dans les angles hachurés de la figure 8 qui sont les angles morts de l'appareil.

Mais ce n'est pas là un inconvénient réel, car lorsqu'il se produit,

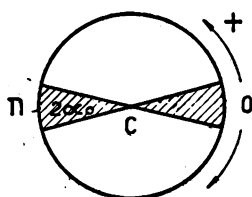


Figure 8.

il suffit pour le faire disparaître de changer la phase du courant de référence, ce dont on est toujours maître.

Les trois potentiomètres sont manœuvrés par les mêmes commandes.

Comme le potentiomètre proprement dit détermine le module de $\frac{I}{I_0}$

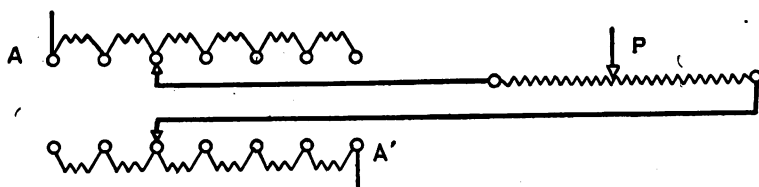


Figure 9.

les potentiomètres sont établis de manière à fournir des mesures très précises (de l'ordre de $\frac{1}{100}$).

Pour cela chaque potentiomètre comprend un potentiomètre à grande variation A A' (fig. 9) et un potentiomètre d'appareil P.

La graduation est établie de manière que l'on puisse lire directement les modules respectifs de $\frac{I}{I_0}$ et $\frac{i}{I}$.

Jusqu'à maintenant, le potentiomètre-phasemètre n'a été établi que pour les fréquences musicales. Le phasemètre proprement dit com-

prend un jeu de 3 selfs utilisables à volonté. Ces selfs ont les valeurs respectives de 25, 50 et 100 mH.

Le rhéostat double du phasemètre comprend trois décades.

La capacité du phasemètre est indépendante de l'appareil de même que le système détecteur.

Les résistances diverses des potentiomètres et du phasemètre sont bobinées sans self.

Le potentiomètre-phasemètre est construit par les Ateliers F. Carpentier.

L'obtention du zéro dans la branche de détection du potentiomètre-phasemètre nécessite évidemment la manœuvre simultanée du potentiomètre et du phasemètre. Mais cette manœuvre est particulièrement facile : on dégrossit d'abord et l'on termine à l'aide du potentiomètre d'appoint et de la decade du phasemètre qui fait varier la résistance x d'ohm en ohm. La position des manettes qui assure le zéro est très précise. Si le courant I est très faible (il peut être très inférieur à $1 \mu A$) le courant qui circule dans la branche de détection est très petit et peut nécessiter l'emploi d'un amplificateur.

Il est nécessaire alors de se prémunir contre les effets d'induction et les effets de capacité qui fausseraient les mesures.

III. — Application du Potentiomètre-Phasemètre

Les applications du potentiomètre-phasemètre sont très nombreuses ; nous n'en citerons qu'un petit nombre parmi les principales. Ces applications peuvent se diviser en deux catégories : les applications électriques et les applications mécaniques ou acoustiques.

APPLICATIONS ÉLECTRIQUES

1° *Mesure des impédances*

Le potentiomètre-phasemètre remplace avantageusement le pont de Wheatstone à courant alternatif. Il fournit directement le vecteur impédance (module et phase) quels que soient le signe et la valeur absolue de la phase. Il est donc d'un emploi plus avantageux que le pont de Wheatstone qui doit être adapté à la nature de l'impédance mesurée, suivant que celle-ci présente de la self ou de la capacité. Cet avantage est très marqué si l'on se propose d'étudier les variations du vec-

leur impédance en fonction de la fréquence par exemple car il se peut qu'alors la phase de l'impédance change de signe en passant par la valeur zéro.

La source de courant alternatif qui doit être employée de préférence pour cette mesure est un oscillateur à lampes de fréquence réglable d'une manière continue, cet oscillateur étant établi de manière à ne fournir que très peu d'harmoniques. Les générateurs de courant ondulé construits par les Ateliers Carpentier répondent à ces desiderata. Le montage à effectuer est conforme au schéma de la figure 10.

Le générateur alimente, soit directement, soit par couplage avec une bobine auxiliaire, une résistance a de faible valeur. On fournit ainsi

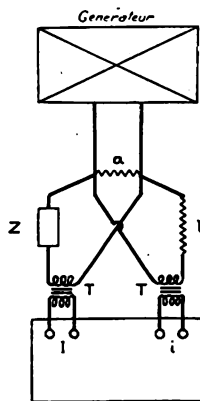


Figure 10.

au dispositif de mesure une énergie suffisante mais des tensions très faibles grâce auxquelles les capacités parasites n'auront aucune influence appréciable.

En parallèle avec la résistance a sont associés respectivement le circuit de l'impédance Z et un circuit de résistance comme b . Ce dernier circuit détermine le courant de référence.

Les circuits Z et b sont connectés au potentiomètre de deux transformateurs spéciaux T . Ces derniers sont absolument identiques. Leur impédance propre est très faible, de manière à ne pas altérer sensiblement l'impédance des circuits Z et b . D'ailleurs il est possible de réduire à volonté la modification apportée par ces transformateurs à l'impédance des circuits Z et b ; il suffit pour cela de shunter par une résistance appropriée les circuits primaires respectifs de ces transformateurs. Enfin, si l'on désire une extrême précision, il est toujours

possible de tenir compte de l'impédance propre des transformateurs qui sont soigneusement étalonnés.

Du fait que la résistance des circuits d'entrée du potentiomètre-phasemètre est constante, les transformateurs ont exactement le même rapport effectif de transformation. Les courants primaires sont donc

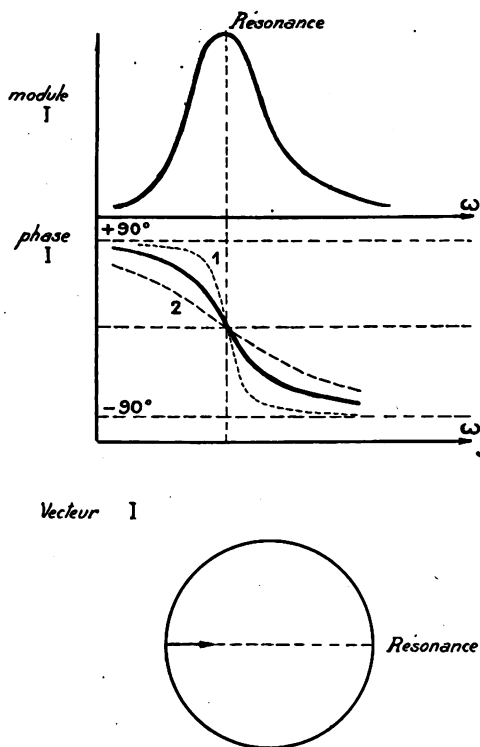


Figure 11.

rigoureusement proportionnels aux courants secondaires.

On a dès alors :

$$Z = b \frac{i}{I} \quad (16)$$

le vecteur $\frac{i}{I}$ étant fourni par le potentiomètre-phasemètre. On voit que le vecteur Z qui est homothétique de $\frac{i}{I}$ est entièrement déterminé. Comme application du dispositif qui vient d'être décrit, citons l'étude de la résonance d'un circuit oscillant. Les variations du vecteur cou-

rant I sont homothétiques de celles du vecteur admittance $\frac{1}{Z}$. L'étude du vecteur I fournit donc à une constante près le vecteur $\frac{1}{Z}$. La figure 11 représente graphiquement le résultat type que l'on obtient en général.

Le graphique du module du courant I n'est autre que la courbe en cloche bien connue.

Le graphique de la phase montre que celle-ci, dans un intervalle de fréquence encadrant la résonance, subit une variation voisine de 180° .

Cette variation de la phase caractérise beaucoup mieux le phénomène de résonance que le passage du courant par un maximum. Il peut se faire en effet que pour des causes diverses, le courant soit maximum à une certaine fréquence, mais si ce maximum du courant n'est pas accompagné d'une variation de phase de grande amplitude, le phénomène étudié n'est pas celui de la résonance.

Plus la résonance est aiguë, plus la variation de phase qui l'accompagne est rapide, de sorte que l'on peut évaluer exactement le facteur d'amortissement ou le décrément logarithmique du circuit étudié en mesurant la pente que présente le graphique de la phase au point correspondant à la résonance. Ainsi la courbe en pointillé 1 correspond à une résonance aiguë, la courbe en pointillé 2 correspond à une résonance amortie.

Le graphique du vecteur courant est une courbe très voisine d'un cercle. On a exactement un cercle si la résonance est très aiguë car alors, dans l'intervalle restreint de fréquences où se développe le phénomène de résonance, les coefficients du circuit self, résistance, capacité, sont pratiquement constants. D'une façon générale le graphique du vecteur courant est parfaitement circulaire le long d'un arc plus ou moins grand englobant le point qui correspond à la résonance.

2° Etude des transformateurs

Le potentiomètre-phasemètre permet d'effectuer l'étude complète des transformateurs car il est susceptible de mesurer avec précision la distorsion des vecteurs courants primaire et secondaire, le rapport effectif de transformation et d'une façon générale l'effet de toute modification aux circuits primaire ou secondaire.

Comme exemple de montage, la figure 12 représente le schéma à utiliser pour l'étude de la distorsion du courant secondaire d'un transformateur en fonctionnement normal.

La distorsion du vecteur courant secondaire et l'étude de la fonction vectorielle qui relie ce courant à la f. é. m. primaire. On se propose donc d'étudier le vecteur

$$D = \frac{I_2}{E}. \quad (17)$$

On voit en se reportant à ce que nous avons exposé plus haut que D n'est autre que l'admittance apparente du circuit secondaire.

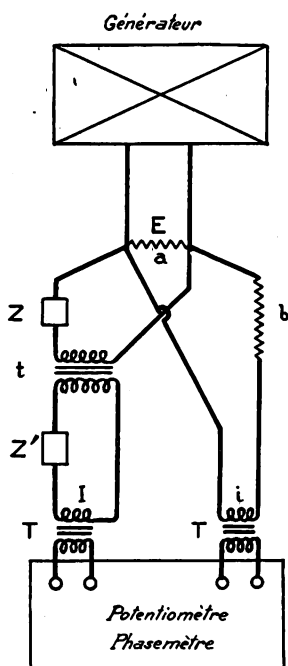


Figure 12.

La force électromotrice E est due à la chute ohmique du courant transmis à la résistance a par le générateur de courant ondulé.

Aux bornes de a sont connectées en parallèle le circuit primaire du transformateur étudié t et un circuit comprenant une résistance comme b .

Les circuits du transformateur t sont reliés aux impédances Z et Z' que comporte l'emploi normal de ce transformateur. Par exemple Z peut être une ligne artificielle et Z' un téléphone.

Le potentiomètre-phasemètre est relié au circuit secondaire t et au circuit de la résistance b au moyen des transformateurs spéciaux T décrits plus haut.

On a

$$\frac{I}{i} = \frac{Ib}{E}$$

d'où

$$\frac{I}{E} = \frac{I}{i} \cdot \frac{1}{b} \quad (18)$$

Le potentiomètre-phasemètre fournissant directement le vecteur $\frac{I}{i}$ on détermine donc bien par cette méthode le vecteur $\frac{I}{E}$.

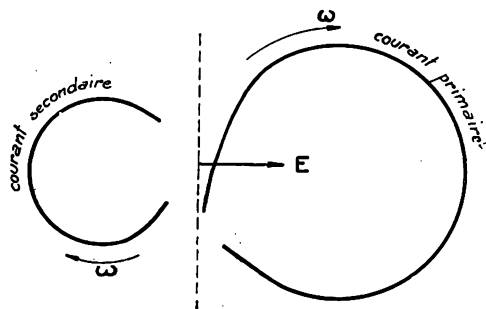


Figure 13.

La figure 13 représente les graphiques vectoriels obtenus dans l'étude de la distorsion des courants primaire et secondaire d'un transformateur dont le circuit secondaire comportait une capacité créant une résonance dans l'intervalle de fréquence utilisé.

La figure 14 représente les résultats obtenus dans l'étude de rapport optimum de transformation d'un transformateur dont le nombre de spires secondaires était variable.

La mesure est effectuée à fréquence constante et pour trois valeurs distinctes r_1 , r_2 , r_3 d'une résistance intercalée dans le circuit secondaire.

Les divers graphiques de la figure 14 ont été déterminés point par point car le nombre de spires secondaires n_2 n'était variable que par fractions déterminées.

On sait que pour chaque valeur de la résistance secondaire le module du rapport $\frac{I_2}{I_1}$ passe par un maximum. On voit sur le graphique de la phase que les 3 courbes correspondent respectivement à r_1 r_2 r_3 se rencontrent en un même point pour $n_2 = 0$.

Ce point correspond à un angle de phase supérieur en valeur absolue à 90° . L'excès β de cet angle sur 90° mesure l'angle de pertes du circuit magnétique du transformateur.

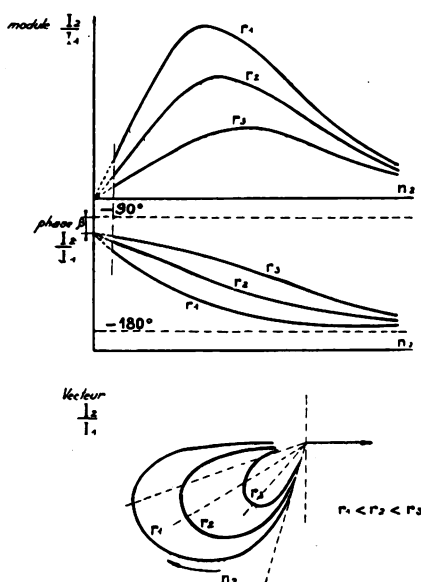


Figure 14.

La figure 15 représente graphiquement la variation du rapport effectif de transformation $\frac{I_2}{I_1}$ d'un transformateur dont on fait varier la résistance intercalée dans le circuit secondaire.

APPLICATIONS MÉCANIQUES OU ACOUSTIQUES

1° Etude de l'état vibratoire d'un corps solide

On utilise pour cette étude, comme appareils auxiliaires, de petits vibreurs ou mécasopes ⁽¹⁾ excités à la manière d'un téléphone. Etant réversibles les mécasopes peuvent être utilisés comme émetteurs ou récepteurs.

(1) Construits par les Ateliers J. Carpentier.

Le mécascope émetteur est fixé en un point du corps solide étudié. Il transmet à ce corps un certain état vibratoire fonction de la fréquence et de la position du mécascope émetteur.

Le mécascope récepteur, appuyé en un point quelconque du corps solide, fournit une f. é. m. alternative proportionnelle à l'amplitude des vibrations du corps solide au point considéré.

On étudie les variations de ce courant par rapport au courant de référence qui est fourni par le générateur de courant ondulé.

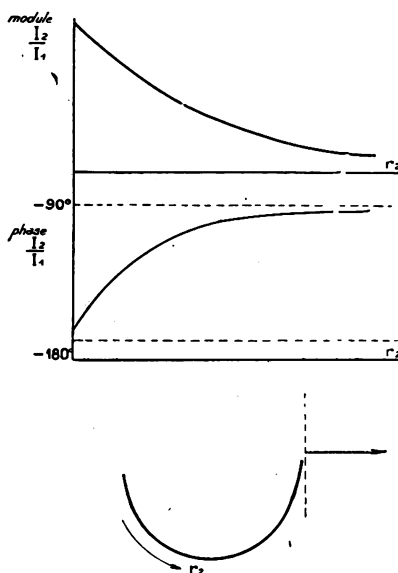


Figure 15.

Le montage des appareils est conforme au schéma de la figure 16.

Pour que le vecteur de référence soit de l'ordre de grandeur du vecteur I , qui est en général très faible, on se contente de faire agir le générateur sur le circuit du courant de référence au moyen d'un couplage très lâche.

On obtient ainsi dans une série de mesures les vecteurs $V_0, V_1, V_2 \dots V_n$ correspondant aux points d'application $P_0, P_1, P_2 \dots P_n$ du mécascope récepteur. On forme les rapports

$$\frac{V_1}{V_0} \frac{V_2}{V_0} \dots \frac{V_n}{V_0}$$

et l'on a ainsi une évaluation de l'amplitude vibratoire du solide rapportée à l'amplitude au point P_0 .

Au moyen d'un dispositif expérimental tout à fait analogue, on peut étudier le champ acoustique d'une salle. Pour cela on utilise comme émetteur un haut-parleur qui est excité par le générateur de courant ondulé. Ce haut-parleur est placé en divers points intéressants et excité à diverses fréquences.

On emploie comme récepteur un simple téléphone électromagnétique. Le courant de référence est fourni par le générateur au moyen d'un couplage lâche.

Pour chaque fréquence et chaque emplacement de l'émetteur on étudie les interférences du champ acoustique.

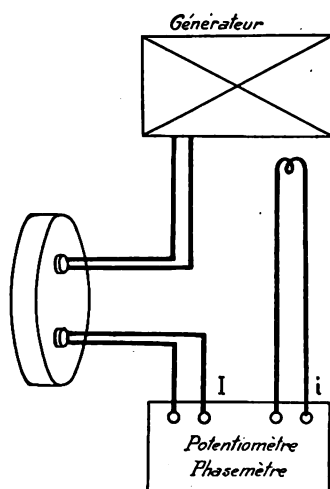


Figure 16.

On peut rattacher à ce genre d'expérience la mesure du taux d'émission d'un appareil phonique dans diverses directions.

Pour cela un récepteur téléphonique est placé en un point fixe à quelque distance de l'appareil phonique étudié. Le courant de référence est fourni par le générateur qui excite l'appareil phonique. Ce dernier est orienté dans diverses directions. On reporte ces directions sur un graphique et l'on trace pour chacune d'elles un rayon vecteur proportionnel au module de la mesure correspondante. En joignant les extrémités des rayons vecteurs par un circuit continu on obtient une courbe ayant par exemple l'allure de la figure 17:

Les résultats expérimentaux pouvant être faussés par les distorsions qu'apportent au champ acoustique les obstacles voisins, il est nécessaire d'opérer en plein air ou dans une chambre sourde.

2° Etude du coefficient de réflexion d'une substance
acoustique donnée

Pour que la mesure ait la précision désirable, il est nécessaire d'utiliser une source sonore de très petites dimensions, de manière à pou-

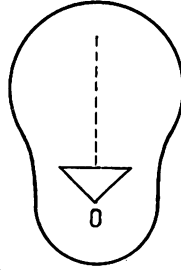


Figure 17.

voir former une onde sphérique dans un très petit espace. Il est également nécessaire d'utiliser un récepteur sonore de très petites dimen-

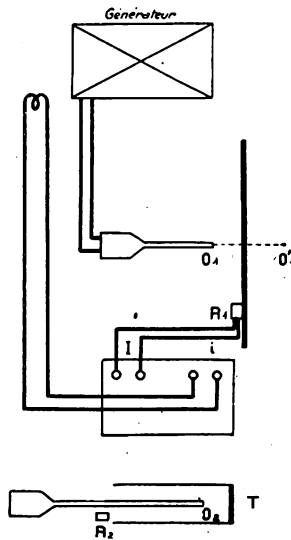


Figure 18.

sions n'apportant que des perturbations négligeables au champ acoustique.

On peut réaliser un émetteur acoustique ponctuel en plaquant un téléphone dans une chambre à parois épaisses, la membrane de ce télé-

phone portant devant un long tube de verre, relié par un joint étanche au son, à la chambre susdite. Tout se passe donc pratiquement comme si l'embouchure extérieure du tube de verre susdit émettait seule.

Un récepteur acoustique ponctuel sera simplement un téléphone spécial de très petites dimensions. Si la substance étudiée se présente sous la forme d'un panneau suffisamment grand, on opère comme suit :

L'émetteur ponctuel est placé dans l'axe du panneau de manière à ce que son embouchure émettrice soit en o_1 (fig. 18). Le récepteur ponctuel est placé en R_1 contre le panneau. Il se trouve alors soumis

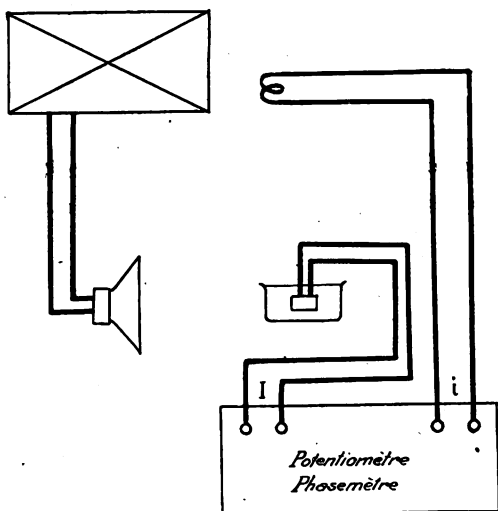


Figure 19.

à l'action de la source réelle o_1 et de son image o'_1 . Le courant de référence est encore fourni par le générateur qui excite l'émetteur ponctuel. On fait une première mesure dans les conditions susdites. On fait une seconde mesure en effaçant le panneau et en maintenant l'émetteur et le récepteur ponctuel à leurs positions primitives. Il est aisé de déduire de ces deux mesures le coefficient de réflexion du panneau.

Si l'échantillon de la substance étudiée est de très faibles dimensions, on l'utilise pour tapisser le fond d'un tuyau sonore T dont on étudie les nœuds et les ventres. L'extrémité émettrice de l'émetteur ponctuel est à l'intérieur du tuyau dans l'axe de celui-ci, de manière à provoquer une résonance maxima ou minima du tuyau. Le récep-

teur ponctuel est placé à poste fixe près de l'embouchure du tuyau. Après une série de mesures dans ces conditions on enlève l'échantillon de substance qui tapisse le fond du tuyau et l'on recommence les mesures. De la comparaison des résultats on déduit le coefficient de réflexion de la substance étudiée.

Le coefficient de la réfraction sera étudié à l'aide d'un dispositif expérimental analogue.

3° Etude du spectre sonore d'un appareil phonique

On utilise pour cela un microphone très amorti qui peut être constitué par exemple par un téléphone ordinaire plongé dans un bac plein d'huile.

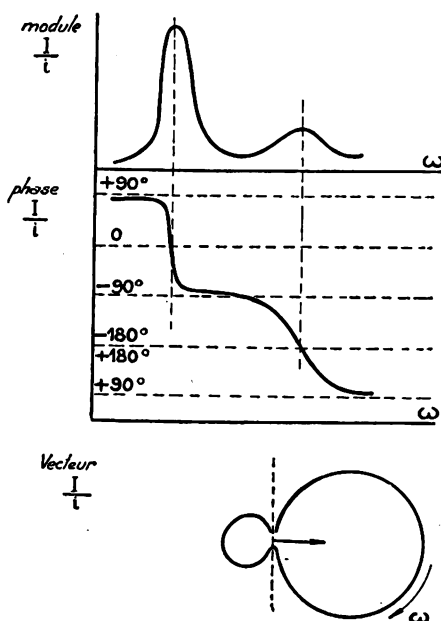


Figure 20.

Le montage à utiliser est celui de la figure 19. Le courant de référence est toujours fourni par le générateur qui alimente l'appareil phonique.

La figure 20 représente les graphiques obtenus dans une étude de ce genre. Cette méthode est à rapprocher de celle du professeur Kennelly qui consiste à mesurer l'impédance cinétique.

Elle présente sur cette dernière l'avantage de ne faire ressortir que les propriétés rayonnantes de l'appareil étudié.

LES APPLICATIONS DE LA TRACTION PAR ACCUMULATEURS AUX POIDS LOURDS ⁽¹⁾

par M. GASQUET

CAMIONS A ACCUMULATEURS

A l'époque de la précédente communication ⁽¹⁾, notre propagande portait presque exclusivement sur les chariots et nous étions très prudents dans nos réponses lorsqu'on nous demandait des renseignements sur les camions et les camionnettes parce que la plupart de ceux qui étaient offerts étaient encore dans la période de mise au point.

Nous insistons d'ailleurs sur le fait que les imperfections constatées étaient d'ordre *mécanique* et ne diminuaient en rien les qualités du véhicule électrique en lui-même.

Que nous acceptions maintenant de parler des poids lourds à accumulateurs est la preuve que la situation est changée ; il y a deux ans des camions paraissant bien conçus et bien réalisés étaient déjà exploités dans notre pays, mais à nos yeux leur apparition était encore trop récente pour que fût démontrée de façon certaine leur aptitude à assurer un service prolongé. Plusieurs années d'exploitation régulière et des centaines de mille de kilomètres parcourus sont venus confirmer les prévisions et nous permettent de dire qu'il existe maintenant des camions électriques français, pourvus de solides références et capables d'assurer dans d'excellentes conditions des services industriels.

DOMAINE DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Est-ce à dire pour cela que tout le camionnage puisse être fait électriquement ? Assurément non. Le véhicule à accumulateurs est strictement réservé aux parcours limités, à vitesse modérée ; il ne saurait lutter dans toutes les applications contre le véhicule thermique qui reste à l'heure actuelle le seul maître de la route pour les longues distances et les grandes vitesses ; il convient particulièrement pour les services à arrêts fréquents ; grâce à sa souplesse, qui lui permet des démarrages rapides, il réalise alors une vitesse commerciale compa-

(1) Communication présentée à la séance publique mensuelle de la Société française des Electriciens le 1^{er} mars 1930.

nable à celle du véhicule thermique et son moteur cessant de tourner, toute consommation est évitée pendant les arrêts. Services urbains et suburbains, navettes entre deux points rapprochés, deux usines, usine et gare par exemple, sont donc l'apanage du véhicule électrique.

Citer des chiffres sur ses possibilités ? Elles sont tellement un cas d'espèce qu'aucun chiffre n'a de valeur absolue : profil du parcours, chargement, nombre d'arrêts, possibilité ou non de biberonner dans le courant de la journée, choix du véhicule et de sa batterie sont autant de facteurs qui font varier le parcours journalier maximum et tel véhicule, qui dans certaines conditions pourra effectuer 50 km dans la journée, pourra, dans d'autres services, parcourir 70 km et même davantage. Chaque problème de transport est donc à étudier spécialement pour voir s'il peut être résolu économiquement par l'emploi de la traction électrique.

AVANTAGES DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Convenablement employé, le véhicule électrique possède des avantages bien connus ; nous ne saurions mieux les exposer qu'en reproduisant à son sujet l'opinion du président de l'American Railway Express Co, très importante société assurant aux Etats-Unis l'enlèvement et la livraison des bagages, qui exploite environ 2 000 véhicules électriques, concurremment avec 5 000 automobiles environ à essence et un grand nombre de chevaux :

- « 1° Le véhicule électrique réduit beaucoup les frais d'exploitation ;
- 2° Il est le plus rapide sur les parcours limités ou comprenant de nombreux arrêts ;
- 3° Sa simplicité le rend facile à conduire et à réparer ;
- 4° Il est robuste et sûr, tombant rarement en panne et est moins souvent indisponible que les autres types de véhicules ;
- 5° Le véhicule électrique dure sensiblement plus longtemps que le véhicule thermique ;
- 6° Le véhicule électrique transporte ses marchandises dans de bonnes conditions de propreté et d'hygiène ;
- 7° Le véhicule électrique est doux ;
- 8° Le véhicule électrique est inodore ;

9° Il peut se garer au quai de chargement, ce qui supprime l'obligation d'un garage spécial ;

10° Il gaspille le minimum d'énergie ;

11° Il est capable d'atteindre la vitesse maxima compatible avec une conduite prudente dans les agglomérations et une faible dépense d'énergie ;

12° Le contrôle de la vitesse par l'employeur résulte de la nature du véhicule ;

13° L'effort de traction du véhicule électrique est le plus élevé, eu égard à la puissance utilisée ;

14° Les risques d'incendie, d'accidents et de vol sont les plus faibles ;

15° Il coûte moins cher à exploiter et à entretenir.

DÉVELOPPEMENT DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES EN FRANCE ET A L'ÉTRANGER

Bien que strictement limité comme nous l'avons exposé plus haut le domaine du véhicule électrique est suffisamment vaste et c'est en restant dans ces limites que les exploitations se sont développées en France et à l'étranger.

En tête viennent les Etats-Unis, qui sont pourtant les premiers producteurs de pétrole du monde, avec une vingtaine de mille de camions à accumulateurs. Puis, citées par ordre alphabétique, l'Allemagne, la Grande-Bretagne, et l'Italie.

La France est restée longtemps en arrière, mais depuis l'apparition des véhicules dont nous avons parlé plus haut, l'application de la traction électrique aux poids lourds s'est développée d'une façon très satisfaisante. Citons l'exemple de la Société Lyonnaise pour l'Exploitation de Véhicules Electriques (S.L.E.V.E.) qui, ayant installé un garage pour une quarantaine de véhicules, s'est trouvée à la fin de son premier exercice dans l'obligation d'en construire un nouveau, le premier étant plein ; elle a prévu la surface de son nouveau local double de celle du premier. La S.L.E.V.E. a contribué l'année dernière à la fondation de la Société Alsacienne de Véhicules Electriques (S.A.V.E.) qui commence à exercer son activité dans les départements du Haut et du Bas-Rhin. Citons encore à Paris la Compagnie des Camions

Electriques qui, en un an environ, a mis en exploitation 25 camions. Ces différentes sociétés louent des camions à des industriels et à des commerçants. La régularité avec laquelle elles ont dès le début assuré leurs services et leurs conditions de prix avantageuses leur ont permis d'augmenter très rapidement leur clientèle.

APPLICATIONS DES CAMIONS ÉLECTRIQUES

Dans le domaine que nous avons indiqué, services urbains et suburbains, navettes, les applications des véhicules électriques sont nombreuses. Nous énumérons ci-dessous quelques-unes de celles qui sont réalisées.

Entreprises de camionnage. — Citons en Amérique l'importante Cie Ajax dont 96 pour 100 des camions sont électriques et dont certain ont plus de 20 ans de service. En France, les maisons Ameline, Chauvière, Hernu-Péron, Walbaum, etc...

Transport de charbon et de coke. — La Sté du Gaz de Paris utilise dix camions de 5 t pour la livraison du coke. La Cie du Gaz de Lyon, divers marchands de charbon de Lyon et diverses usines en emploient plusieurs.

Transport de Produits alimentaires. — Les véhicules électriques ne dégageant pas d'odeur sont tout à fait indiqués. L'entreprise américaine de boulangerie Ward Baking C^o possède un millier de véhicules électriques. A Londres, Lyon's et C^o, hôteliers, restaurateurs, pâtisseries, confiseurs, qui fabriquent eux-mêmes la plus grande partie des produits qu'ils vendent, ont des camions électriques. A Milan, une cinquantaine de camions électriques font le service des Halles.

Camionnage des chemins de fer. — Des camions électriques sont employés pour le camionnage de la Cie de l'Est à Paris et à Reims. Nous avons cité plus haut l'American Railway Express C^o qui, pour l'enlèvement et la livraison des bagages à domicile utilise environ 2 000 camions électriques ; nous pouvons ajouter l'importante compagnie d'express anglaise Carter Paterson et C^o.

Enlèvement des ordures ménagères. — Cette application convient particulièrement bien aux véhicules électriques, en raison des arrêts très rapprochés. Plusieurs villes françaises sont déjà venues à la trac-

tion électrique pour ce service : Bourges, Mulhouse, Nogent, Rueil, Tours, Villeurbanne ; d'autres étudient la question. A l'Etranger, cette application est très développée, notamment en Grande-Bretagne où 93 villes de plus de 50 000 habitants et quelques villes de moindre importance utilisent des camions électriques ; presque partout où ils sont employés, ces derniers éliminent progressivement les camions à essence et les chevaux (à Birmingham, il y a une centaine de camions électriques et pas de camions à essence ; à Glasgow, il y en a plus de 60 ; à Sheffield, il y en a 72, pas de chevaux et pas de camions à essence). Citons encore l'exemple de l'Italie (60 camions électriques pour les services municipaux de Turin) et de l'Allemagne.

Observations de M. Gratzmuller

M. GRATZMULLER insiste sur l'intérêt de la transmission électrique aux véhicules de très gros tonnage. Par sa souplesse, sa faculté de surcharge considérable, surtout en période de démarrage, elle permet la précision des manœuvres les plus difficiles en profitant du maximum d'adhérence à chaque instant. Le changement de vitesse électrique, par sa progressivité, est en effet le seul qui assure le bénéfice du maximum d'adhérence, en attendant l'amélioration des changements de vitesse mécaniques.

Pour ces raisons, le Général ESTIENNE et M. BRETON avaient adopté à la fin de la guerre, pour les gros chars d'assaut de 70 t, un système de transmission électro-mécanique, étudié par M. GRATZMULLER, comportant une puissance de 500 à 600 ch .

OUVRAGES OFFERTS

A LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS ⁽¹⁾

RECHERCHES PHYSIQUES

Le Système métrique des poids et mesures, par G. BIGOURDAN. Edité par Gauthier-Villars, 55, quai des Grands-Augustins, à Paris. Un ouvrage broché 24×16 cm. 458 pages (Don des Editeurs).

Gravitation lumière et électromagnétisme, par Emile SEVIN. Edité par Albert Blanchard, 3-3 bis, place de la Sorbonne, à Paris 5^e. Un ouvrage broché de 25×16 cm. 5, 62 pages, année 1930. Prix 18 francs (Don de l'éditeur).

Operational Methods in mathematical physics, par HAROLD JEFFREYS. Edité par Cambridge University Press, à London Fetter Lane E.C. 4. Un ouvrage 22×14 cm., 100 pages, broché (Don de l'University Press).

ENSEIGNEMENT

Deux heures de Physique, par BIQUARD et JOLIOT. Edité par Kra, 20, rue Henri-Regnault, Paris. Un ouvrage 19×12 cm., 245 pages, année 1930, broché (Don de l'Editeur).

Physique moderne, par G. CASTELFRANCHI. Edité par Albert Blanchard, 3-3 bis, place de la Sorbonne, à Paris 5^e. Un ouvrage broché de 24×16 cm. de 329 pages, année 1930 (Don de l'Editeur). Prix : 70 francs.

CONGRÈS. ACTES OFFICIELS. ANNUIAIRES

Annuaire général de l'Université et de l'enseignement français, année 1929-1930, publié par le Journal l'Information Universitaire, 8 bis, rue de l'Arrivée, Paris 5^e. Un ouvrage de 960 pages broché (Don de l'Information Universitaire).

Conference Internationale des grands réseaux électriques, Session de 1929, de M. Jean TRIBOT LASPIÈRE, édité par la Conférence Internationale, 25, boulevard Malesherbes, à Paris, 3 volumes 24×16 cm. de 720, 779 et 651 pages brochés, année 1929 (Don de l'éditeur).

AVIATION

Sur l'aérodynamique des ailes sustentatrices et des hélices, par MAURECE ROY. Edité par Gauthier-Villars et Cie, à Paris, 55, quai des Grands-Augustins. Un ouvrage broché 25×16,5 cm. de 184 pages, année 1928 (Don des Editeurs).

(1) Ces ouvrages peuvent être consultés à la Bibliothèque de la Société Française des Electriciens, 14, avenue Pierre-Larousse, à Malakoff, de 14 à 18 heures, tous les jours sauf le dimanche.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

ECLAIRAGE. RADIATIONS DIVERSES

Introduction générale à la Photométrie, par Ch. FABRY, Professeur à la Sorbonne et à l'Ecole Polytechnique, Directeur de l'Institut d'Optique, Membre de l'Institut. — Un vol. in-8° de 24,5 × 16,5, 180 pages, 18 f. — Editions de la Revue d'Optique théorique et instrumentale, 3 et 5, boulevard Pasteur, Paris.

L'auteur rappelle les notions fondamentales qui sont à la base de l'étude de la photométrie, ce terme étant pris dans son sens le plus large, puisque cet ouvrage traite aussi bien des radiations invisibles que des radiations visibles. Il indique à cet effet que toutes les unités principales choisies sont d'ordre énergétique. Les définitions d'ordre visuel viennent ensuite, comme cas particulier des premières. On rencontre dans cet ouvrage des développements complets consacrés aux questions de pression de radiation, brillance, radiance, etc. A côté des développements purement théoriques l'auteur indique un certain nombre de renseignements d'ordre pratique, comme par exemple, un tableau donnant la valeur des éclaircissements minimum et maximum rencontrés en pratique. Un chapitre est consacré à l'étude de la polarisation, examinée au point de vue de son importance en photométrie. D'autres chapitres traitent du même point de vue les questions de rayonnement des corps chauffés, de réflexion, d'absorption, et de la diffusion.

MATHÉMATIQUES

Leçons sur les systèmes d'équations aux dérivées partielles, par MAURICE JANET, Professeur à l'Université de Caen, 1929. Volume 25 cm × 16,5 cm, éditeur Gauthier-Villars et Cie, à Paris, 55, quai des Grands-Augustins. (Don des Editeurs.)

Les leçons rassemblées dans ce volume ont été professées à l'Université de Cracovie en 1926; elles sont groupées en 4 chapitres :

Chapitre I : Calcul inverse de la dérivation.

Chapitre II : Démonstration de l'existence des solutions d'une équation aux dérivées partielles. Caractéristiques.

Chapitre III : Système d'équations du premier ordre à une inconnue. Système d'ordre quelconque à une ou plusieurs inconnues. Méthode générale permettant de passer du cas de $n-1$ variables indépendantes au cas de n .

Chapitre IV : Systèmes en involution.

L'ouvrage se termine par une note sur la convergence des développements en série des solutions et une seconde note sur les multiplicités caractéristiques des systèmes d'équations aux dérivées partielles.

RECHERCHES PHYSIQUES

Conférences d'Actualités scientifiques et industrielles. — Un vol. de 270 pages 25 × 16. — Librairie Hermann, 6, rue de la Sorbonne, Paris.

Ce recueil reproduit les conférences faites en avril, mai, juin 1929 au Conservatoire des Arts et Métiers, sur les théories de la Physique Moderne.

Louis de Broglie : *La crise récente de l'optique ondulatoire*.

Foëx : *Les substances mésomorphes, leurs propriétés magnétiques*.

Eugène Bloch : *Les atomes de la lumière et les Quanta*.

Dunoyer : *La cellule photo-électrique et ses applications.*

Ribaud : *Le rayonnement des corps incandescents.*

Lieutenant-Colonel Jullien : *Applications du courant électrique, des oscillations radio-électriques et des phénomènes photo-électriques à la réalisation d'instruments de musique.*

Léon Bloch : *Structure des Spectres et Structure des atomes.*

Kammerer : *Les hautes pressions de vapeur.*

Mesny : *Les ondes dirigées et leurs applications.*

Les noms des conférenciers et les sujets traités attireront certainement l'attention de tous ceux qui sont épris de culture scientifique et curieux de savoir dans quelle direction vont actuellement les savants.

Introduction à l'étude de la Mécanique ondulatoire, par Louis DE BROGLIE, Maître de conférences à la Sorbonne. — Un vol. de 202 pages 25 × 16,5. — Librairie Hermann, 6, rue de la Sorbonne, Paris.

Dans ce magistral ouvrage, qui fera certainement époque dans la Littérature Scientifique moderne, le savant éminent Louis de Broglie, lauréat du prix Nobel, expose les théories mathématiques de la nouvelle mécanique ondulatoire, qui l'ont rendu célèbre dans le monde entier, en montrant que, pour la matière et le rayonnement, on doit admettre le dualisme des ondes et des corpuscules.

Après avoir rappelé les anciennes mécaniques du point matériel et la théorie de Jacobi, il développe les idées de base de la mécanique ondulatoire, les généralités sur la propagation des ondes, compare la mécanique classique et la mécanique ondulatoire, traite des interférences et de la diffraction des électrons par les cristaux, étudie la mécanique ondulatoire des corpuscules de lumière et des systèmes en corpuscules, les théories d'Heisenberg et de Bohr, celles de l'onde associée aux mouvements d'un système, celles des Quanta et de la stabilité des mouvements quantifiés et termine par quelques exemples de quantification.

Leçons de Photométrie professées à l'Institut d'Optique par M. Charles FABRY, Membre de l'Institut. — Un vol in-8° 22,5 × 16 de 145 pages, 14 f. — Editions de la Revue d'Optique théorique et instrumentale, 5, boulevard Pasteur, Paris.

L'auteur définit le but de la photométrie qui est de mesurer l'intensité des radiations visibles ou invisibles. Il rappelle les notions de radiance et de brillance et indique leurs relations. Il insiste sur le rôle essentiel joué par l'œil dans toutes ces mesures et il indique les influences que les défauts physiologiques de l'œil ont sur ces mesures. Un chapitre est consacré à l'étude des divers étalons lumineux dont on indique les difficultés de réalisation.

Un chapitre traite des procédés photométriques, puis des appareils photométriques : on y trouve la description de nombreux types de photométrie, luximètres, lumenmètres, ainsi qu'un développement particulier aux appareils spéciaux pour la mesure des rayonnements hétérochromes.

Dans les derniers chapitres l'auteur traite la question de la photométrie physique, c'est-à-dire celle dans laquelle l'œil est remplacé par la cellule photo-électrique, le sélénium, ou la plaque photographique.

Le temps absolu et l'espace à quatre dimensions, par E. SEVIN, Ingénieur en chef de la Compagnie d'Orléans.

Cet ouvrage débute par des considérations exposant comment on peut accéder à la notion de l'espace à quatre dimensions par une opération de l'esprit analogue à celle qui permet de passer de l'espace à une dimension à celui à deux, puis de celui-ci, à celui à trois dimensions. L'originalité de cette présentation réside dans la possibilité de supprimer la nécessité de recourir à la notion de temps, que l'on rencontre en général au début de toutes les études sur l'espace à quatre dimensions. Les hypothèses inédites, formulées par l'auteur sur la constitution de l'éther lui permettent d'expliquer les phénomènes bien connus de la mécanique tels que la gravitation, ou au contraire ceux moins familiers tels que la contraction des corps matériels en mouvement, les expériences de Michelson et Miller sur l'entraînement de l'éther et la polarisation de la lumière. Dans la dernière partie de cet ouvrage, l'auteur montre que ces hypothèses expliquent également les diverses anomalies constatées dans le mouvement des étoiles et des planètes, ce qui constitue un criterium de leur valeur, singulièrement sensible.

Réflexions sur la Mécanique ondulatoire, par E. DE CAMAS.

Ce livre constitue un recueil d'hypothèses et de considérations personnelles émises par l'auteur sur la constitution des atomes et sur celle de l'éther. Il contient de nombreux aperçus originaux. Pour lever les contradictions qui se présentent dans l'étude des notions rencontrées dans ce domaine particulier, l'auteur est conduit à attribuer aux atomes et à l'éther certaines propriétés. Il a été amené en particulier à introduire la notion de la densité variable de l'éther, ce qui lui a permis d'émettre diverses hypothèses sur les phénomènes de transformation de l'énergie. L'auteur étudie en outre les rapports de la mécanique ondulatoire avec l'astronomie et avec la classification des éléments, dont il donne un exemple original. Il indique également un moyen permettant de se représenter rationnellement l'espace à quatre dimensions.

La Décharge électrique dans le vide et dans les gaz, par Maurice LEBLANC, Membre de l'Institut, et Maurice LEBLANC fils, Agrégé des Sciences physiques. — Un vol. gr. in-8° de 375 pages. — Broché : 70 f.; relié : 85 f. — Collection des Grandes Encyclopédies Industrielles, publiées sous la direction de M. A. Blondel, Membre de l'Institut. — J.-B. Baillière, éditeur.

La mort de M. Maurice Leblanc survenue en 1923 et si cruellement ressentie par le monde scientifique tout entier, ne lui a pas permis de terminer lui-même cet intéressant ouvrage. Avec un pieux respect filial, M. Maurice Leblanc fils, que ses travaux personnels mettaient mieux que personne à même de le faire, a continué sa tâche, et nous donne aujourd'hui une encyclopédie très complète sur ces questions qui sont à l'ordre du jour.

La première partie est un exposé très clair des notions modernes de physique, et de la constitution atomique de l'électricité.

La deuxième partie expose les phénomènes qui accompagnent le passage de l'électricité dans le vide et dans les gaz.

Enfin la troisième partie est consacrée aux applications industrielles si diverses et si nombreuses aujourd'hui de tous ces phénomènes.

Cet ouvrage qui vient à son heure est indispensable à tous les ingénieurs électriciens, car il n'est pas une installation moderne un peu importante qui ne soit tributaire de ces applications.

ENSEIGNEMENT

Leçons sur la Résistance des fluides non visqueux, professées par Paul PAINLEVÉ, rédigées par A. METRAL et R. MAZET. — Un volume broché de 25,5 × 16,5 de 183 pages, Paris, 1930. — Gauthier-Villars et Cie, éditeurs. — Hommage de l'auteur.

Cet ouvrage, première partie des leçons que professe M. Painlevé sur la théorie des fluides traite du mouvement d'un corps solide dans un fluide, problème qui domine toute la théorie de l'aérodynamique et la théorie de l'aviation.

Après avoir rappelé les lois générales de l'hydrodynamique et les lois empiriques de la résistance de l'air ainsi que certaines formules et théories mathématiques utiles à la compréhension de l'ouvrage, l'auteur étudie la cinématique des milieux continus puis le mouvement d'un fluide parfait pesant dans lequel est immergé un solide.

Cet ouvrage, qui a un caractère théorique et général, fournira des renseignements utiles à ceux qui voudront entreprendre des études sur le mouvement des corps solides dans les fluides.

Leçons sur l'Hydrodynamique, par Henri VILLAT. — Un volume broché de 25,5 × 16,5 de 206 pages, Paris, 1929. — Gauthier-Villars et Cie, éditeurs. — Hommage de l'auteur.

Dans ce livre, les plus récentes théories de l'hydrodynamique sont traitées aussi clairement que le permet la complexité du sujet. Un lecteur possédant une bonne culture mathématique suit aisément les développements d'autant mieux que l'auteur a tenu à rappeler dans les premiers chapitres certaines questions mathématiques un peu spéciales.

L'auteur expose d'abord la théorie des sillages concernant le mouvement d'un solide dans un fluide parfait. Il aborde ensuite le point capital de son étude, c'est-à-dire la détermination des propriétés et particularités du mouvement d'un fluide parfait en les considérant comme la limite de celles qui correspondent à un fluide visqueux dont la viscosité, très faible, tendrait vers zéro. Il met en évidence les difficultés du passage à la limite, expose la théorie de M. C. W. Oseen sur les fluides visqueux (équations intégrales de l'hydrodynamique) et construit une solution du cas limite. Il donne ensuite les résultats obtenus dans la recherche de la solution de problèmes particuliers importants et termine en indiquant les conditions dans lesquelles les théories précédentes s'appliquent dans le cas de fluides limités par des parois fines.

Ainsi que l'auteur le met en évidence, les théories actuelles de l'hydrodynamique ne s'adaptent pas encore parfaitement aux résultats expérimentaux; cependant les travaux relatifs à ces questions sont de grande importance du fait qu'ils facilitent la mise au point de théories plus complètes et plus satisfaisantes.

Le livre de M. Henri Villat qui précise si nettement l'état actuel de l'hydrodynamique apportera sans aucun doute une aide précieuse à tous ceux qui consacrent leurs efforts au développement de cette science.

Leçons sur les conduites, par Ch. CAMICHEL. — Un volume broché de 25,5 × 16,5 de 101 pages, Paris, 1930. — Gauthier-Villars et Cie, éditeurs. — Hommage de l'auteur.

Dans cet ouvrage, l'auteur utilise les travaux publiés sur les conduites au cours de ces vingt dernières années, en particulier ceux de MM. Joukowski, Allievi à l'étranger et de MM. Râteau, de Sparre, Jouguet, Eydoux, Gariel et lui-même en France. Il rappelle tout d'abord les équations générales auxquelles satisfont les vitesses et les pressions dans une conduite en tenant compte de la compressibilité de l'eau et de la dilatation de la paroi et donne les formules d'Allievi sur la vitesse de propagation des ondes et de M. de Suarre qui permettent de calculer la valeur des coups de belier dans les cas de fermeture ou d'ouverture brusque ou progressive des conduites.

Il étudie ensuite les phénomènes de résonance des harmoniques et montre comment ceux-ci peuvent être mis en évidence expérimentalement, notamment, comment on peut entretenir les ondes au moyen d'un clapet automatique.

Le second chapitre est consacré à l'étude des mêmes phénomènes dans les conduites à caractéristiques multiples, c'est-à-dire celles dont le diamètre et surtout l'épaisseur varient d'une extrémité à l'autre.

Dans le chapitre suivant, qui étudie les conduites possédant des réservoirs, sont données les formules de M. Râteau.

Des applications numériques des théories sont données par l'auteur dans le cours de l'ouvrage.

Un dernier chapitre, d'un caractère pratique, précise l'état actuel de l'industrie des conduites.

Cet ouvrage intéressera tous les ingénieurs s'occupant d'aménagement d'usines hydrauliques, il leur évitera de rechercher dans les mémoires originaux les théories concernant les conduites et les guidera dans l'application de ces théories grâce aux exemples traités par l'auteur.

Leçons élémentaires de Physique, par Albert TURPAIX, Professeur à la Faculté des Sciences de Poitiers. — Deux vol. de 23 × 14,5 de 516 et 942 pages. — Librairie Vuibert, 63, boulevard Saint-Germain, Paris.

Cet ouvrage, destiné plus particulièrement aux candidats au Certificat d'Etudes Physiques, Chimiques et Naturelles (P. C. N.) s'adresse à tous ceux qui, sans vouloir aborder les théories mathématiques de la Physique moderne, ne sauraient cependant se contenter des notions acquises dans l'enseignement secondaire.

Toutes les parties de la Physique y sont successivement traitées :

Pesanteur, Statique des fluides, Chaleur, Thermodynamique, Optique géométrique, Etude des vibrations, Acoustique, Optique physique, Electricité, Ondes électriques, Télégraphie sans fil, Météorologie.

La rédaction, bien ordonnée, clairement présentée, justifie le succès croissant de ce traité, qui est aujourd'hui à sa 8^e édition.

Traité de Physique générale et expérimentale, par MM. J. LEMOINE et A. BLANC. — 1^{er} vol., *Mécanique et Chaleur*, 16×25, 861 pages, 711 figures. — Prix : 100 f. — Librairie de l'Enseignement technique, 3, rue Thénard, Paris.

Les auteurs exposent l'ensemble de la physique actuelle d'une manière très expérimentale et très concrète; le plan de l'ouvrage ne correspond à aucun programme officiel, ayant eu pour point de départ le cours professé au Conservatoire des Arts et Métiers. Les calculs et l'emploi des formules y sont réduits au strict indispensable. Par contre, les descriptions d'expériences y occupent une grande place et elles sont accompagnées de nombreuses figures toujours très claires. Le premier volume est consacré à la Mécanique et à la Chaleur. Il contient la description des instruments modernes pour la mesure des longueurs, des pesées, les principes de la mécanique et leurs applications au gyroscope par exemple, l'étude du mouvement des fluides, l'étude des équilibres, la théorie cinétique, les moteurs thermiques, etc...

Cours d'Electricité à l'usage de l'enseignement supérieur scientifique et technique, par G. BRUHAT. — 2^e édition, un vol. 24×16 de 740 pages. — Masson, éditeur, 120, boulevard Saint-Germain, Paris (3^e).

Cet ouvrage se classe au premier rang pour l'étude des lois générales de l'électricité. Bien qu'il s'adresse tout particulièrement aux candidats à la Licence et à l'Agrégation, il intéressera au plus haut degré les ingénieurs électriciens qui veulent se tenir au courant de toutes les théories de la Physique moderne. A la suite des chapitres sur les questions classiques de l'Electrostatique, du Magnétisme, de l'Electromagnétisme, de l'Induction, l'auteur a rassemblé dans un exposé magistral et d'une limpide clarté, les théories électroniques, celles de la radioactivité, des quanta, de la télégraphie et de la téléphonie sans fil. Parvenu à la fin du volume, le lecteur aura certainement acquis la culture générale indispensable pour aborder avec fruit une étude quelconque d'Electrotechnique.

LÉGISLATION

Les syndicats financiers. — Un vol. in8° broché, par J. TCHERNOFF, Avocat à la Cour de Paris. — Prix : 50 fr. — Librairie du Recueil Sirey, 22, rue Soufflot, Paris.

L'auteur définit les diverses formes de syndicats financiers: d'émission, de placement, d'achat, de défense, etc. Il expose les conditions de leur formation, leur rôle, leur fonctionnement, et notamment leur influence sur la Bourse. Il examine toutes les règles juridiques et pénales relatives aux contrats syndicaux.

Cet ouvrage contient en particulier un développement consacré à la législation récente concernant la hausse ou la baisse illicite des titres, et l'auteur délimite avec soin le domaine de l'action licite, et celui de l'action illicite.

A côté de la partie théorique, l'auteur consacre un chapitre à l'étude pratique et détaillée de plusieurs syndicats et on trouve dans cet ouvrage des modèles d'actes syndicaux des plus variés avec analyse précise des clauses syndicales.

La législation des chutes d'eau. — Sources. — Rivières. — Cours d'eau non navigables, par PAUL BOUGAULT, Avocat à la Cour d'Appel de Lyon. Un volume 16,5 cm×25 cm de 351 pages, édité par Jules Rey, 23, Grande-Rue, à Grenoble. Troisième édition, 1912. Prix : 9 francs.

L'ouvrage comporte 7 chapitres :

Le chapitre 1 traite de la condition juridique des chutes d'eau (Chutes formées par les sources; droits du propriétaire de la source; restrictions à ces droits. Chutes d'eau produites par les rivières navigables et flottables. Chutes d'eau produite par les cours d'eau non navigables ni flottables).

L'étude des droits du riverain sur l'eau des rivières non navigables forme le chapitre II (droits de riveraineté, droits et obligations du propriétaire dont le fonds est seulement bordé par la rivière et du propriétaire des deux rives : Modifications qui peuvent être apportées aux droits des riverains.

L'étude de l'article 645 du Code civil est faite dans le chapitre III (Notions générales sur le règlement d'eau. Circonstances qui limitent le pouvoir du juge).

Les droits du riverain sur le lit sont exposés dans le chapitre IV.

Le chapitre V étudie les lois relatives à l'irrigation, en particulier la loi du 25 avril 1845.

Le chapitre VI traite du pouvoir et des droits d'administration sur les rivières non navigables (Règlements administratifs, Autorisations individuelles pour l'autorisation des chutes.)

Enfin le chapitre VII expose les réformes législatives proposées.

Divers documents sont annexés à la fin de l'ouvrage, notamment la loi du 8 avril 1898 sur le Régime des eaux, et le décret du 1^{er} août 1905 relatif aux autorisations d'ouvrages sur les rivières non navigables.

En résumé, ce livre est spécialement destiné à servir de guide à l'hydraulicien qui se trouve en face d'une dérivation à faire; l'Auteur a certainement atteint le maximum de clarté et de précision que comporte le sujet traité.

La législation nouvelle des chutes d'eau, par PAUL BOUGAULT, Avocat à la Cour d'Appel de Lyon, 1921. Un volume 16,5 cm x 25 cm de 265 pages, édité par Jules Rey, 23, Grande-Rue, à Grenoble et par Gauthier-Villars et Cie, 55, quai des Grands-Augustins, à Paris. Prix : 25 francs.

Cet ouvrage comporte un commentaire très détaillé et très clair de la loi du 16 octobre 1919 relative à l'utilisation de l'Energie hydraulique et des Règlements annexes.

D'après cette loi, qui a 33 articles, les chutes d'eau dont la puissance maximum n'est pas supérieure à 150 kW, sont soumises simplement à l'autorisation administrative; les chutes supérieures à 150 kW sont soumises à la concession, si leur objet principal consiste dans la fourniture d'énergie électrique à des services publics; si l'objet principal est au contraire de nature privée (électro-chimie, électrometallurgie, etc.) la concession n'est de vigueur qu'au delà de 500 kW.

La première partie de l'ouvrage concerne les entreprises « concédées » par décret ou par une loi suivant leur importance; une analyse très serrée y est faite du « cahier des charges-type », tel qu'il a été établi, en 61 articles, par le décret du 5 septembre 1920; le texte de ce cahier des charges-type figure intégralement parmi les pièces annexes de la fin du livre.

La seconde partie concerne les entreprises simplement « autorisées », dont la puissance ne dépasse pas suivant les cas envisagés plus haut, 500 kW ou 150 kW. Le décret du 30 juillet 1920, dont le texte en 23 articles est donné parmi les pièces annexes, indique les formalités à accomplir pour obtenir une autorisation.

La troisième partie a trait aux entreprises autorisées ou concédées antérieurement à la loi du 16 octobre 1919, et qui demeurent pendant 75 ans soumises au régime qui leur était applicable.

Enfin la dernière partie commente toutes les autres dispositions prévues par la loi.

L'ouvrage de M. Paul Bougault est indispensable à tous les exploitants d'énergie hydraulique.

Cahier des Charges pour les distributions d'énergie. Décret du 28 juin 1921 (Distribution communale), par PAUL BOUGAULT, Avocat à la Cour d'Appel de Lyon, 1922. Un volume 16,5 cm x 25 cm de 345 pages, édité par Jules Rey, 23, Grande-Rue, à Grenoble. Prix : 25 francs.

Ce livre est fait pour les concessionnaires des distributions communales d'énergie électrique.

La première partie de l'ouvrage expose les principes juridiques généraux sur la concession de distribution; l'auteur y a résumé la doctrine, la jurisprudence, les formalités administratives de toute nature, notamment les formalités pour l'obtention d'une concession simple et l'obtention d'une concession déclarée d'utilité publique.

La seconde partie donne le texte et le commentaire du Cahier des Charges type pour la concession d'une distribution publique d'énergie électrique par une commune ou un syndicat de communes, conformément au décret du 28 juin 1921. La méthode du commentaire article par article a été adoptée pour les 36 articles et a permis de présenter des modèles sur les points délicats; index économique haute et basse tension, puissance maxima de la distribution, garantie de recette, compteurs, branchements, polices, rachat de la concession, etc.

Le livre de M. Bougault est le guide le plus sûr et le plus complet pour les concessionnaires des distributions communales d'électricité.

CONGRÈS. ACTES OFFICIELS. ANNUAIRE

Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à Haute Tension.

— Compte rendu des travaux de la cinquième session (6-15 juin 1929) établi par M. Jean TRIBOT-LASPIÈRE, Délégué général de la Conférence. — Trois volumes édités par la Conférence Internationale, 25, boulevard Malesherbes, Paris.

Ce compte rendu des travaux de la 5^e session de la Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à Haute Tension comprend trois volumes formant au total un texte de plus de 2.000 pages. Le tome I, après une introduction contenant une notice sur la session, les rapports généraux des Présidents des Sections, la liste des rapports présentés et la liste des membres, est consacrée aux travaux de la 1^{re} Section : Production et transformation du courant. Il renferme 30 rapports dont le texte ainsi que les discussions qui ont suivies, sont donnés intégralement et qui concernent l'emploi des combustibles, les machines et appareils de transformation (turbines, alternateurs, interrupteurs à huile, transformateurs), la marche en parallèle des centrales entre elles, les isolants et en particulier les huiles.

Le tome II résume les travaux de la 2^e Section représentés par les rapports au nombre de 37 et leur discussion, traitant du calcul et de la construction des lignes, de l'appareillage et des sous-stations, des poteaux et pylônes, des isolateurs, des câbles et conducteurs, des effets des arcs et des coups de foudre.

Le tome III contient les 33 rapports et discussions présentés à la troisième Section (Exploitation et protection des Réseaux). Ces travaux sont classés en huit chapitres groupant les questions d'exploitation proprement dite, celles relatives à la puissance réactive, à la mesure et à la tarification de l'énergie, à la mise à la terre du neutre, aux surtensions, à la commande à distance des appareils, à l'influence des lignes H. T. sur les circuits B. T. et enfin à des questions diverses (chauffage urbain, statistique internationale, unification de la fréquence des réseaux de la Région Parisienne).

Il est superflu, après le succès croissant des sessions de la Conférence Internationale — la dernière session a réuni plus de 700 membres représentant 29 pays participants — de souligner l'intérêt que présente un tel ouvrage, pour les ingénieurs qui ont suivi les séances comme pour ceux qui n'ont pu participer effectivement aux réunions, et aux visites d'installations. Les rapports présentés et les discussions auxquels ils ont donné lieu, permettait en effet, grâce à l'importance et à la variété des questions traitées, de marquer l'étape franchie depuis 1927 aussi bien en technique pure qu'en technique appliquée. Ils constituent un document de premier ordre que les ingénieurs ne pourront se dispenser de consulter fréquemment pour résoudre, en tenant compte de l'expérience acquise dans le Monde, les problèmes vitaux que le développement de l'électrification soulève dans tous les pays.

AVIATION

L'Aérodynamique des ailes sustentatrices et des hélices, par Maurice Roy, préface de Henri VILLAT. — Un volume broché de $25,5 \times 16,5$ de 181 pages, Paris, 1928. — Gauthier-Villars et Cie, éditeurs. — Hommage de l'auteur.

Cet ouvrage, qui ne renferme ni descriptions d'appareils, ni résultats expérimentaux, constitue principalement une théorie approfondie et exclusivement mathématique de l'aérodynamique des surfaces sustentatrices, développée par l'auteur en se basant sur les formules classiques de l'Hydrodynamique.

Dans les diverses parties de cet ouvrage, l'auteur examine successivement et du point de vue de l'hydrodynamique rationnelle l'aérodynamique de surfaces sustentatrices théoriques présentant une envergure infinie puis celle de surfaces d'envergure limitée et développe en particulier la théorie des influences mutuelles entre surfaces superposées. L'ouvrage se termine par une intéressante application aux propulseurs hélicoïdaux des théories précédemment développées.

En raison de son caractère théorique, cet ouvrage ne s'adresse qu'aux lecteurs très familiarisés avec l'analyse mathématique et la mécanique des fluides et dans son avant-propos, l'Auteur le destine surtout aux chercheurs désireux d'approfondir et de développer les théories actuelles de l'aérodynamique.

IL Y A TRENTE ANS

Bulletin de juillet-août 1900

Le bulletin de juillet-août 1900, ainsi que celui de septembre-octobre, est entièrement consacré à une revue très complète, par M. M. Aliamet, des appareils électriques de mesure figurant à l'Exposition Universelle de 1900.

Les appareils existant à cette époque sont très clairement décrits dans des monographies illustrées : on n'en relève pas moins de 39 pour la mesure des intensités, 18 pour la mesure des tensions, 16 pour celle des résistances, sans compter les étalons de capacité et de self-induction, les wattmètres, phasemètres, fréquencemètres, oscillographes, enregistreurs, perméamètres, hystérésimètres, pyromètres, etc.

L'appendice qui termine ce travail et qui est inséré à la fin du bulletin de septembre-octobre 1900 cite pour chaque catégorie d'appareils les noms des constructeurs qui les ont présentés. On remarque la part très brillante occupée au milieu des maisons allemandes, anglaises, américaines, hongroises, italiennes, russes, par les exposants français : Bréguet, Carpentier, Chauvin et Arnoux, Daydé et Pillé, Ducretet, Fabius Henrion, Gaiffe, Gramme, Richard, Société Industrielle des Téléphones, laboratoire Volta.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS

SOMMAIRE

COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS :

Réunion ordinaire mensuelle du Mercredi 4 juin 1930, p. 814.
Admission de Membres titulaires, p. 814.

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

Oscillations sinusoïdales et de relaxation (M. le Dr. Balth. VAN DER POL), p. 818.
— Les progrès récents de l'emploi du four électrique en aciérie (M. LEVASSEUR),
p. 850.

INFORMATIONS DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

Compte rendu du Congrès de Tokio (M. PERNOT), p. 880.

TRAVAUX DES SECTIONS (1)

Les nouveaux dispositifs de chronométrage électrique au central interurbain
de Paris (M. NIMIER), p. 883. — Note sur l'interconnexion des stations centrales
des usines métallurgiques du bassin de Briey par le réseau de la Société
électrique de la Sidérurgie Lorraine (M. SEKUROWICZ), p. 889. — La chute de
tension au contact des balais sur les bagues collectrices (M. PERRIER), p. 903.
Appareil "Mader Ott" pour l'analyse des courbes périodiques (M. HEYBERGER),
p. 918.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 923.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

La reproduction des mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des Auteurs.

Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant le manuscrit.

4^e série, tome X, n° 408.

COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du Mercredi 4 Juin 1930

Présidence de M. PARODI

La séance est ouverte à 16 h. 30.

Le Procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

Aleksandravicius (Vincas, Bronius), Elève à l'E. S. E., 2, rue Béranger, à Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Barré (Jean, Léon, Jacques. Marie), Elève à l'E. S. E., 53, avenue de Neuilly, à Neuilly (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Battegay (Constant), Administrateur-Délégué de la Société des Ateliers Brillié, 28, boulevard de Villiers, à Levallois-Perret (Seine). — Présenté par MM. Grosselin et G.-E. Petit.

Beaudonnet (Jean), Capitaine à l'Etablissement Central du Matériel spécial du Génie, Elève à l'E. S. E., 10, rue d'Angoulême, à Versailles (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Beaumarchais (Charles de), Administrateur-Délégué de la Société « Le Matériel Electrique S. W. », 3, rue Octave-Feuillet, à Paris (16^e). — Présenté par MM. Rougé et Bunet.

Beauvillain (Maurice), Elève à l'E. S. E., 40, rue Danicourt, à Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Berlioux (Etienne, Félix), Ingénieur aux Etablissements Merlin et Guérin, Agence de Paris, 215, rue des Pyrénées, Paris (20^e). — Présenté par MM. Félix et Saury.

Berton (Charles, Lucien, Ernest), Elève à l'E. S. E., 42, rue Victor-Hugo, à Rosny-sous-Bois (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Bonnin (Georges, Pierre, Alfred), Elève à l'E. S. E., 9, rue Céline-Dubois, à Montrouge (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Bouchet (Léandre, Maurice), Elève à l'E. S. E., 2, rue Saint-Ferdinand, à Paris (17^e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Bouvier (Georges, Elie, Julien), Elève à l'E. S. E., 17, rue Marbeau, à Paris (16^e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Brault (Etienne), Elève à l'E. S. E., 2, place du Théâtre, à Chartres (Eure-et-Loir). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Carton (Ernest), Elève à l'E. S. E., 229, rue de Vanves, à Paris (14^e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Cassou (Jean, Victor), Elève à l'E. S. E., 21, boulevard Jourdan, Paris (14^e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

- Compagnie Centrale d'Énergie Électrique**, 3, rue Moncey, Paris (9^e). — Présenté par MM. Parodi et Grosselin.
- Compagnie des Chemins de fer du Midi**, 54, boulevard Haussmann, Paris (8^e). — Présentée par MM. Parodi et Grosselin.
- Compagnie des Forges et Aciéries de la Marine et d'Homécourt**, 12, rue de la Rochefoucauld, à Paris (9^e). — Présentée par MM. Parodi et Grosselin.
- Compagnie des Tramways de Nantes**, 110, boulevard Michelet, à Nantes (Loire-Inférieure). — Présenté par MM. Parodi et Grosselin.
- Cousin** (Marcel, Marie, Antoine), Ingénieur I. E. G., Compagnie Générale d'Électricité, 15, rue Passet, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Dumont et Grosselin.
- Demozay** (Lucien, Eugène, Martin), Administrateur des Établissements J. Holtzer, à Fraisses (Loire). — Présenté par MM. Viel et Garnier.
- Duco** (Marcel), Constructeur électricien, 11, rue de la Croix-Blanche, à Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. Ledieu et de Le Viellenze.
- Foltzer** (Raymond, Henri, Ernest), Ingénieur A. M., Elève de l'E. S. E., à Cheny (Yonne). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Fréchou** (Gabriel), Elève à l'E. S. E., 9 bis, rue Saint-Jean, à Perpignan (Pyrénées-Orientales). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Garrelon** (Jacques, Henry, Léon), Elève à l'E. S. E., 35, rue Edgard-Quinet, à Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Gasdeblay** (René), Capitaine à l'Inspection permanente des fabrications de l'artillerie, 31, rue Victor-Hugo, à Châtillon-sous-Bagneux (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Graf** (Tiburce), Elève à l'E. S. E., 15, rue Marcelin-Berthelot, à Vanves (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Guillemot** (Stéphane), Secrétaire Général de la Société « Le Matériel Électrique S.W. », 3, rue Leconte-de-Lisle, à Paris (16^e). — Présenté par MM. Rougé et Brunet.
- Kessedjian** (Jean), Elève à l'E. S. E., 12, rue Saint-James, à Valence-sur-Rhône (Drôme). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Koulomzine** (Nikita), Elève à l'E. S. E., 14, rue des Fontenelles, à Sèvres (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- La Bakélite**, 14, rue Roquépine, Paris (8^e). — Présentée par MM. Parodi et Grosselin.
- Labonnote** (Jean, Marie, Louis), Elève à l'E. S. E., 150, boulevard Liberté, à Casablanca (Maroc).
- Lac** (André, Louis), Ingénieur E. S. M., Elève à l'E. S. E., 14, rue Voltaire, à Saint-Ouen (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Lacroix** (M^{lle} Louise), Elève à l'E. S. E., École Polytechnique, 21, rue Descartes, à Paris (5^e). — Présentée par MM. Janet et Guilbert.
- Lafon** (André), Elève à l'E. S. E., 2, rue Béranger, Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- L'Éclairage des Véhicules sur Rail**, 22, rue de l'Arcade, Paris (8^e). — Présenté par MM. Parodi et Grosselin.
- Lemaire** (Pierre, Marie, Joseph), Ingénieur, 16, rue Chevreul, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Dumont et Delon.
- Lépine** (Jean, François, René, Alfred), Elève à l'E. S. E., 8 bis, Villa d'Arcueil, à Vanves (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Les Laboratoires Standard**, 46, avenue de Breteuil, à Paris (7^e). — Présentés par MM. Parodi et Grosselin.

- Noiriel** (Jean, Pierre), Elève à l'E. S. E., Ingénieur E. S. M. E., 1, rue de Fleurus, à Paris (6^e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Pecherski** (Thadée, Casimir), Elève à l'E. S. E., 8 bis, Villa d'Arcueil, à Vanves (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Pelletier** (Jean, Marc, Laurent), Ingénieur A. et M., Elève à l'E. S. E., 18, rue Guilhem, Paris (11^e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Petit** (Auguste), Adjoint à l'Ingénieur en chef à la Compagnie des Lampes, 19, rue Sainte-Geneviève, à Vitry-sur-Seine (Seine). — Présenté par MM. Ayral et Kahn.
- Pleijel** (Henning, Bernhard, Mathias), Professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique Royale de Stockholm, Eriksbergsgatan 3, à Stockholm (Suède). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Rajewski** (Marjan), Elève à l'E. S. E., Licencié ès-sciences, 8 bis, Villa d'Arcueil, à Vanves (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Renaudin** (Eugène, Louis), Ingénieur A. et M., Elève à l'E. S. E., Usine du Palmier, quartier des Roches-Noires, à Casablanca (Maroc). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Robert** (Jean, Achille, Lucien), Elève à l'E. S. E., 41, boulevard A.-France, à Meudon (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Roguinsky** (Alexandre), Elève à l'E. S. E., 7, rue Jules-Breton, à Paris (13^e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Société Algérienne d'Eclairage et de Force**, 2, rue Jean-Rameau, à Alger (Algérie). — Présentée par MM. Parodi et Grosselin.
- Société des Téléphones Ericsson**, 33, boulevard d'Achères, à Colombes (Seine). — Présentée par MM. Parodi et Grosselin.
- Société Financière de Transports et d'Entreprises Industrielles**, 38, rue de Naples, à Bruxelles (Belgique). — Présenté par MM. Parodi et Grosselin.
- Tessier** (Georges, Maurice), Elève à l'E. S. E., 2, rue Béranger, à Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Turenne** (Pierre, Marie, Alfred), Ingénieur I. E. M. (Ecole Bréguet), 156, boulevard Péreire, à Paris (17^e). — Présenté par MM. Turenne et G. E. Petit.
- Ulrich** (Jacques), Elève à l'E. S. E., Ingénieur E. S. M. E., 87, boulevard Raspail, Paris (6^e). — Présenté par MM. Ulrich et Martin.
- Ulrich** (Martial), Elève à l'E. S. E., Ingénieur E. S. M. E., 87, boulevard Raspail, Paris (6^e). — Présenté par MM. Ulrich et Esbran.
- Yalois** (Napoléon), Ingénieur en chef du Bureau d'Etudes et Contrôles Industriels de MM. Colins et Gens, 46, rue des Carmes, Nancy. Domicile : 5, place des Ducs-de-Bar, Nancy (Meurthe-et-Moselle). — Présenté par MM. Bonnin et Vassilière.
- Vernier** (Léon), Ingénieur, Chef de service à la Société Alsthom, 125, rue Cambronne, Paris (15^e). — Présenté par MM. Saint-Germain et G.-E. Petit.

Sans opposition de la part des Membres présents, ces candidats sont élus Membres titulaires de la Société.

M. le Président. — « Je n'ai pas besoin de vous présenter M. Roger SMITH qui a été pendant un grand nombre d'années l'ingénieur électricien du Great Northern Railway et qui a été Président de l'Institution of Electrical Engineers il y a une dizaine d'années. M. Roger SMITH a beaucoup étudié toutes les questions de traction électrique et il est un des experts anglais les plus qualifiés en la matière. »

M. le Président cède le fauteuil à M. BUNET pendant que lui-même traduit la communication de M. SMITH ⁽¹⁾.

Il est exposé, dans cette conférence, que le courant électrique de traction en Grande-Bretagne normalisé pour les tensions de 3 000, 1 500 et 750 V, n'est appliqué systématiquement qu'aux lignes urbaines ou suburbaines à grand trafic : malgré cette spécialisation la Grande-Bretagne est le pays du monde où l'importance du réseau électrifié est peut-être la plus grande, au moins en ce qui concerne le nombre de voyageurs transportés électriquement.

M. Bunet rend le fauteuil à M. Parodi après lui avoir exprimé les félicitations et les remerciements pour la manière si vivante dont il s'est fait l'interprète de M. Smith.

M. Parodi pose à M. Smith quelques questions complémentaires qui seront publiées à la suite de la conférence.

M. ABADIE présente une communication sur *les tubes luminescents à basse tension* qu'il fait fonctionner devant les auditeurs.

M. le Président. — Je suis certain d'être l'interprète de tous en remerciant M. ABADIE pour sa communication très intéressante et pour ses très curieuses expériences. J'espère qu'il nous sera possible de bien apprécier les résultats obtenus avec ces tubes pour l'éclairage des locaux auxquels M. ADABIE a fait allusion.

La séance est levée à 23 h. 15.

(1) Cette communication paraîtra ultérieurement, dans un Bulletin qui contiendra toutes les communications sur la traction électrique.

OSCILLATIONS SINUSOIDALES ET DE RELAXATION

par le Dr. BALTH. VAN DER POL ⁽¹⁾

SOMMAIRE. — L'auteur considère un système électrique comprenant une self-induction et une capacité constantes et une résistance fonction du potentiel v , répondant par conséquent à l'équation

$$L \frac{d^2v}{dt^2} + R(v) \frac{dv}{dt} + \frac{v}{C} = \frac{E(t)}{C}.$$

Si la résistance $R(v)$ est négative lorsque v est inférieur à une certaine valeur, et positive pour les valeurs plus grandes de v , on peut penser qu'en l'absence de f. é. m. imposée $E(t)$, le système sera susceptible d'oscillations propres de périodes et d'amplitudes déterminées, l'énergie reçue pendant la portion de période où R est négatif compensant exactement l'énergie dissipée lorsque R est positif.

L'auteur choisit pour forme normale des oscillations de ce type celles définies par l'équation $y'' - \varepsilon(1-y^2)y' + y = 0$. Il montre que dans le cas où ε est très petit, la solution périodique, atteinte au bout d'un très grand nombre d'oscillations est très voisine d'une sinusoïde. Dans le cas où ε est très grand, la solution périodique atteinte très rapidement a une forme différant beaucoup d'une sinusoïde. Les cas extrêmes sont déjà pratiquement atteints pour $\varepsilon = 0,1$ et $\varepsilon = 10$ respectivement. Pour $\varepsilon = 1$, par exemple, on a une forme intermédiaire.

Le cas extrême de ε très grand présente un intérêt particulier, en ce qu'il englobe un grand nombre de phénomènes naturels périodiques, dont l'assimilation à une oscillation sinusoïdale est manifestement impossible. Les oscillations de cette espèce présentent, en dehors de leur forme particulière, trois caractères physique remarquable: 1° leur période est donnée par un produit de deux

grandeurs du type CR , ou du type $L \times \frac{1}{R}$ (temps de relaxation), au lieu d'être

donnée, comme la période d'un système sinusoïdal, par la racine carrée d'un produit de deux grandeurs du type LC ; 2° elles se synchronisent aisément avec une force sinusoïdale de fréquence assez différente de la leur, mais, si leur période peut ainsi varier aisément dans de larges limites, leur amplitude reste pratiquement constante; 3° sous l'influence d'une force périodique de fréquence très supérieure à la leur propre, elles adoptent une fréquence qui est un sous-multiple exact de la fréquence de l'oscillation sinusoïdale conductrice, réalisant ainsi une démultiplication de fréquence.

L'auteur considère en détail un grand nombre d'exemples d'oscillations de relation, empruntés à la mécanique, à l'acoustique, à l'électricité à la biologie, à l'économie politique, etc...

(1) Conférences faites à l'Ecole Supérieure d'Electricité, les 10 et 11 mars 1930.

Première Conférence

1. — Pour bien saisir le caractère et les particularités des oscillations de relaxation, il convient d'examiner d'abord avec quelque détail, certaines propriétés des oscillations sinusoïdales.

Partons de l'équation différentielle classique :

$$v'' + \omega^2 v = 0 \quad (1)$$

qui a pour solution :

$$v = A \sin(\omega t + \varphi). \quad (1a)$$

L'équation (1) correspond, à un degré élevé d'approximation, aux oscillations sinusoïdales d'un pendule ; toutefois elle s'écarte de la réalité en un point important, car il y a toujours un certain frottement tant au point de suspension du pendule que de la part de l'air, et cette force de frottement ne figure pas dans (1).

Pour tenir compte de cette force de frottement, l'équation (1) doit s'écrire :

$$v'' + \alpha v' + \omega^2 v = 0, \quad (2)$$

équation où figure maintenant un terme $\alpha v'$, représentant une force retardatrice φ proportionnelle à la vitesse. Ce terme a pour effet de changer (1a) en

$$v = A e^{-\frac{\alpha}{2}t} \sin\left(\sqrt{\omega^2 - \frac{\alpha^2}{4}} t + \varphi\right) \quad (2a)$$

où A et φ sont encore les deux constantes d'intégration que nécessite la solution générale d'une équation différentielle du second ordre.

Il est bien connu que (2a) représente une oscillation amortie, tant que :

$$\frac{\alpha^2}{4} < \omega^2. \quad (4)$$

Dans le cas contraire, l'argument de la fonction sinus devient imaginaire ; le sinus circulaire se change en un sinus hyperbolique et le caractère oscillant de la solution disparaît.

Lord KELVIN a montré le premier que l'équation (2) convient également à un circuit électrique comprenant une self-inductance L , une capacité C et une résistance r en série (fig. 1), à condition de poser :

$$\alpha = \frac{r}{L} \quad \text{et} \quad \omega^2 = \frac{1}{LC}$$

La condition (4) pour que la charge du condensateur soit oscillante s'écrit alors :

$$\frac{r^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}. \quad (5)$$

2. Ceci rappelé, il existe une transformation électrique réciproque très générale, que l'on peut en particulier appliquer au circuit de la fig. 1, et qui transforme un circuit électrique quelconque (A) en un autre circuit (A'). Cette transformation peut être définie mathématiquement comme suit : Ecrivons l'équation différentielle (non nécessairement linéaire) correspondant au premier circuit. Puis récrivons cette équation, en remplaçant tous les courants par des tensions et réciproquement. La nouvelle équation n'a plus de sens physique, ses différents termes n'ayant plus les mêmes dimensions. Pour rétablir

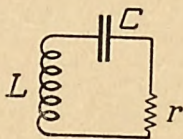


Fig. 1. — Résistance r , self-inductance L et capacité C en série.

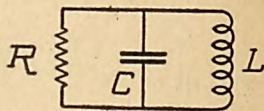


Fig. 2. — Résistance R , capacité C et self-inductance L en parallèle.

l'homogénéité, il suffit de changer les inductances L en capacités C et réciproquement, les résistances R en admittances G et réciproquement.

Si nous cherchons maintenant à former le circuit électrique (A') correspondant à la nouvelle équation, nous trouvons que les éléments qui étaient en série dans le circuit (A) sont en parallèle dans le circuit (A'), les inductances étant devenues des capacités, etc...

Si par exemple nous appliquons cette transformation au circuit de la fig. 1, nous obtenons celui de la fig. 2, où la résistance R shunte maintenant la capacité C au lieu d'être en série avec elle.

L'équation qui régit les variations du courant ou de la tension est encore l'équation (2) où l'on a toujours :

$$\omega^2 = \frac{1}{LC}$$

mais où

$$\alpha = \frac{1}{RC}.$$

Le nouveau circuit est donc d'autant moins amorti que la résistance R est plus grande ou, en d'autres termes, que le condensateur a moins de pertes.

La condition pour que courant et tension soient oscillants est ici :

$$\frac{1}{4R^2C^2} < \frac{1}{LC} \quad (6)$$

et plus la résistance R sera grande, plus le système oscillera longtemps.

3. — Nous pouvons facilement imaginer que la résistance shunt augmente indéfiniment. Faisons un pas de plus et imaginons qu'après avoir été infinie positive, elle devienne infinie négative et qu'ensuite,

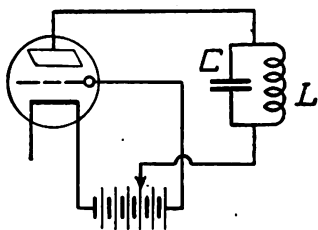


Fig. 3. — Résistance négative d'un dynatron D, capacité C et self-inductance L en parallèle.

tout en restant négative, elle décroisse en valeur absolue jusqu'à la valeur $-R$. Une telle résistance négative est fournie par divers dispositifs, tels qu'un arc, une dynamo série ou un dynatron. Nous pouvons supposer par exemple que dans la figure 2, R représente un dynatron, ce qui nous amène à la figure 3.

Changeant dans l'équation (2) α en $-\alpha$, cette équation devient

$$v'' = \alpha v' + \omega^2 v \quad (3)$$

et a pour solution

$$v = Ae^{\frac{\alpha}{2}t} \sin \left(\sqrt{\omega^2 - \frac{\alpha^2}{4}} t + \varphi \right). \quad (3a)$$

Cette égalité représente encore un mouvement oscillatoire, à condition que

$$\frac{\alpha^2}{4} < \omega^2 \quad (4)$$

ou bien

$$\frac{1}{4R^2C^2} < \frac{1}{LC} \quad (7)$$

ce qui est exactement la condition que nous avons rencontrée en (6) pour le cas d'une résistance positive (l'argument de la fonction sinus étant le même dans les deux cas).

Nous voyons ainsi qu'un système tel que celui de la fig. 2, où une inductance est en série avec un condensateur shunté, devient tout aussi bien apériodique parce que la résistance de fuite R est trop faible positivement, que parce qu'elle est *trop faible négativement*. Exactement de même, un système tel que celui de la fig. 1 peut devenir apériodique, soit parce que sa résistance série r est trop grande positivement, soit parce qu'elle est *trop grande négativement*.

Ces circonstances sont dues au fait que l'expression de la fréquence propre d'un système à un seul degré de liberté, tel que ceux des fig. 1 et 2, ne contient la résistance que par son carré, et que par suite le signe de la résistance n'intervient pas dans cette question.

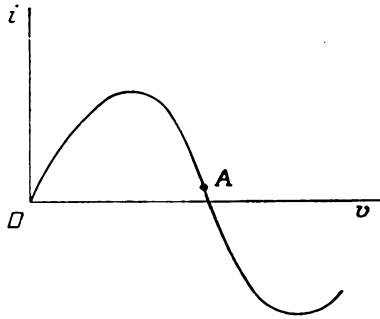


Fig. 4. — Caractéristique d'un dynatron A, point de fonctionnement situé au point d'inflexion de la partie tombante.

4. — Mais le signe de la résistance n'en influence pas moins profondément l'allure générale du phénomène, car lorsque par exemple la condition (7) est réalisée, (3) représente un mouvement oscillatoire dont l'amplitude, au lieu de décroître exponentiellement, *croît* maintenant exponentiellement et augmente au delà de toute limite.

Nous savons toutefois qu'en réalité ceci ne peut pas se produire. La raison pour laquelle l'amplitude des oscillations d'un système à résistance négative ne devient pas infinie est que la *résistance instantanée* R ne garde pas la même valeur quelle que soit l'amplitude, mais au contraire est une *fonction de l'amplitude*.

Ceci signifie que la caractéristique tension-courant du dynatron n'est pas une ligne droite (fig. 4) et que par suite la résistance instantanée

$$\frac{dv}{di}$$

varie d'un point à un autre. Si par exemple nous réglons le dispositif de manière que sa position d'équilibre se trouve à peu près au point d'inflexion A de la caractéristique, l'équation (3) devient

$$v'' - \frac{d}{dt}(\alpha v - \gamma v^2) + \omega^2 v = 0 \quad (8)$$

ou encore

$$v'' - (\alpha - 3\gamma v^2)v' + \omega^2 v = 0. \quad (9)$$

L'interprétation physique de l'équation (9) est aisée. Tant que l'amplitude v reste petite, c'est-à-dire tant que

$$3\gamma v^2 \ll \alpha$$

le système travaille sur une portion rectiligne de sa caractéristique, et le terme $3\gamma v^2$ peut être négligé. Par suite pour ces petites amplitudes l'équation (9) équivaut absolument à l'équation (3). On peut encore dire que tant que les oscillations restent petites, le point représentatif (v , i), n'atteignant pas les parties courbes de la caractéristique, n'a pas conscience de leur existence. Si donc de plus

$$\frac{\alpha^2}{4} < \omega^2,$$

les oscillations, s'amorçant à partir d'une position d'équilibre instable, augmentent d'amplitude exponentiellement comme dans le cas « linéaire ».

Toutefois le processus ne saurait se continuer indéfiniment, attendu que l'expression

$$\alpha - 3\gamma$$

change de signe lorsque v devient assez grand pour que

$$3\gamma v^2 > \alpha.$$

Pour ces grandes amplitudes, le système se comporte comme si la résistance était positive. Il existera donc une certaine amplitude moyenne, telle que l'énergie fournie au système pendant une fraction de période soit exactement égale à l'énergie dissipée pendant le reste de la période, et par suite l'oscillation, qui au début croissait exponentiellement, tendra vers une amplitude finie et déterminée.

5. — Essayons de voir mathématiquement d'un peu plus près comment se produit cette croissance de l'amplitude, jusqu'à une valeur déterminée. A cet effet, faisons dans (8) les substitutions suivantes :

$$\left. \begin{aligned} \omega t &= t' \\ v &= \sqrt{\frac{\alpha}{3\gamma}} y \\ \frac{\alpha}{\omega} &= \epsilon. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

La fonction y , la variable t' et le paramètre ε sont maintenant des nombres absolus sans dimensions.

L'équation (9) devient

$$y'' - \varepsilon(1 - y^2)y' + y = 0. \quad (11)$$

Cette équation (11), et l'équation suivante qui la généralise

$$y'' + \varepsilon\psi(y).y' + y = 0 \quad (12)$$

seront dans ce qui suit à la base de nos considérations.

Lorsque $\psi(y)$ est une fonction arbitraire, représentant une caractéristique quelconque, il est évidemment hors de question d'obtenir la solution générale de l'équation (12), de sorte qu'il est nécessaire de particulariser la fonction $\psi(y)$ même s'il ne s'agit que d'obtenir une solution approchée. Toutefois, bien qu'on ne puisse pas donner explicitement la solution de l'équation (12), il est possible de trouver et de discuter certaines de ses propriétés générales ⁽¹⁾.

Voyons d'abord quelle est la signification physique du paramètre ε dans l'équation (11). Il représente manifestement $\frac{1}{\pi}$ fois l'incrément logarithmique à l'origine :

$$\varepsilon = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{\delta}{\pi}.$$

La signification de ε dans l'équation (12) est encore la même à la condition que la fonction $\psi(y)$ jouisse de la propriété :

$$\psi(0) = -1 \quad (14)$$

qu'elle avait dans l'équation (11).

Nous avons déjà vu que lorsque

$$\varepsilon^2 \ll 1 \quad (15)$$

l'amplitude des oscillations représentées par les équations (11) et (12) commence par croître exponentiellement avec le temps. Nous allons former une solution approchée de (11) ou (12) dans ce cas.

(1) J'indique les références suivantes pour les personnes qui désireraient examiner la question du point de vue mathématique, d'une manière plus détaillée que nous ne pouvons le faire ici :

JANET, *Annales des P. T. T.*, 14, 1193, 1925.

E. et H. CARTAN, *Annales des P. T. T.*, 14, 1196, 1925.

ANDRONOW, *C. R. Ac. Sc.*, 559, 1929.

LIÉNARD, *Rev. Gén. de l'Electr.*, 23, 901, 1925.

ANDRONOW, Les cycles limites de Poincaré et la théorie des oscillations auto-entretenues. *C. R. Ac. Sc.*, 14 oct. 1929, p. 559.

6. — A cet effet, nous introduirons une fonction u du temps t définie de la manière suivante :

$$u(t) = y(t) \times e^{\varepsilon \int \lambda(y) dt} \quad (16)$$

$\lambda(y)$ étant à son tour définie par :

$$\lambda(y) = \frac{1}{y^2} \int \psi(y) y dy \quad (17)$$

de sorte que l'on a en dérivant par rapport au temps

$$\frac{y'}{y} = -\varepsilon \lambda(y) + \frac{u'}{u}. \quad (18)$$

Une deuxième dérivation par rapport au temps donne :

$$y'' + \left[-\varepsilon \lambda(y) + \varepsilon \psi(y) - \frac{u'}{u} \right] y' - \left(\frac{u''}{u} - \frac{u'^2}{u^2} \right) y = 0. \quad (19)$$

Nous pouvons maintenant éliminer y'' entre (12) et (19), ce qui donne

$$\left[\varepsilon \lambda(y) + \frac{u'}{u} \right] y' + \left[\frac{u''}{u} - \frac{u'^2}{u^2} - 1 \right] y = 0 \quad (20)$$

puis ensuite y' entre (18) et (20), ce qui donne finalement

$$u'' + [1 - \varepsilon^2 \lambda^2(y)] u = 0. \quad (21)$$

La substitution (17), qu'il est permis de trouver quelque peu artificielle, nous a donc amenés à l'équation (21), dans laquelle le coefficient de u contient deux termes : l'un égal à l'unité et l'autre comprenant le facteur ε^2 . Or nous avons supposé $\varepsilon^2 \ll 1$ et par suite le second terme peut être négligé pour toutes les valeurs de y pour lesquelles $\lambda(y)$ est de l'ordre de grandeur de l'unité. L'équation (21) se réduit alors à

$$u'' + u = 0 \quad (22)$$

dont l'intégrale générale est :

$$u = A \sin(t + \varphi). \quad (23)$$

Reportant cette expression de u dans l'équation (18), le problème est ramené, toujours dans l'hypothèse $\varepsilon^2 \ll 1$, à l'équation du premier ordre

$$\frac{y'}{y} = -\varepsilon \lambda(y) + \frac{d}{dt} [\log \sin(t + \varphi)]. \quad (24)$$

L'équation (24) peut être explicitement résolue pour un certain nombre de formes particulières de la fonction $\lambda(y)$; par exemple si

$$\psi(y) = y^n, \quad \lambda(y) = \frac{y^n}{n+2}, \quad (25)$$

on a

$$y = \frac{\sin(t + \varphi)}{\left[\frac{n\varepsilon}{n+2} \int \sin^n(t + \varphi) dt + C \right]^{\frac{1}{n}}}. \quad (26)$$

Ou encore, si

$$\psi(y) = -1 + y^{2n}, \quad \lambda(y) = -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{y^{2n}}{n+1} \right) \quad (27)$$

on a

$$y = \frac{\sin(t + \varphi)}{\left[\frac{\varepsilon n}{n+1} e^{-n\varepsilon t} \int e^{n\varepsilon t} \sin^{2n}(t + \varphi) dt + C e^{-n\varepsilon t} \right]^{\frac{1}{2n}}}. \quad (28)$$

Faisons dans (27) l'hypothèse particulière $n=1$, y devient

$$y = \frac{\sin(t + \varphi)}{C e^{-\frac{\varepsilon}{2}t} - \frac{\varepsilon}{3} \cos 2(t + \varphi)} \quad (29)$$

qui au début représente une courbe sinusoïdale, mais dont les oscillations, après avoir crû tout d'abord exponentiellement, finissent par prendre l'allure de celles d'une fonction tg .

Faisons enfin $n=1$ dans (27), l'équation différentielle (22) se réduit à (11) et par suite l'expression (28) nous fournit comme solution approchée de (11) dans le cas $\varepsilon^2 \ll 1$

$$y = \frac{2 \sin(t + \varphi)}{\sqrt{1 + C e^{-\varepsilon t} - \frac{\varepsilon}{3} \sin 2(t + \varphi)}} \quad (30)$$

ou encore en négligeant le dernier terme

$$y = \frac{2 \sin(t + \varphi)}{\sqrt{1 + C e^{-\varepsilon t}}}. \quad (31)$$

7. — L'interprétation physique de cette dernière expression est fort simple, car, en admettant que la constante d'intégration C soit grande vis-à-vis de l'unité, elle s'écrit pour les premières valeurs de t

$$y = \frac{2}{\sqrt{C}} e^{\frac{\varepsilon}{2}t} \sin(t + \varphi) \quad (31a)$$

de sorte que l'amplitude de l'oscillation commence par croître exponentiellement, comme on devait s'y attendre. Mais après quelque temps le terme $C e^{-\varepsilon t}$ devient très petit et par suite le régime permanent final sera, suivant (31),

$$y = 2 \sin(t + \varphi) \quad (31b)$$

c'est-à-dire une oscillation sinusoïdale d'amplitude deux (Fig. 5).

J'ai donné en 1920 une démonstration beaucoup plus courte, mais sans doute moins rigoureuse, de la croissance de l'amplitude de la

valeur zéro à la valeur limite deux, telle que la montre la formule (31). Il est fort remarquable que l'équation

$$A^2 = \frac{a}{be^{-t} + 1} \quad (32)$$

qui représente la croissance du carré A^2 de l'amplitude sous une

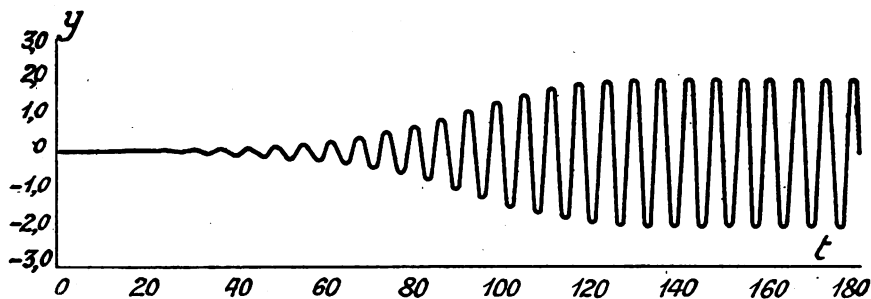


Fig. 5. — Courbe intégrale de l'équation $y'' - \varepsilon(1-y')y' + y = 0$, pour ε très petit. Les oscillations croissent d'abord exponentiellement, puis la courbe tend à s'identifier avec la sinusoïde $y = 2 \sin(t + \varphi)$.

forme un peu plus générale, se rencontre également en biologie ⁽¹⁾. Cette équation (32) représente, d'après PEARL et REED, l'accroissement de densité des *drosophyla* (mouche des fruits). L'accroissement de

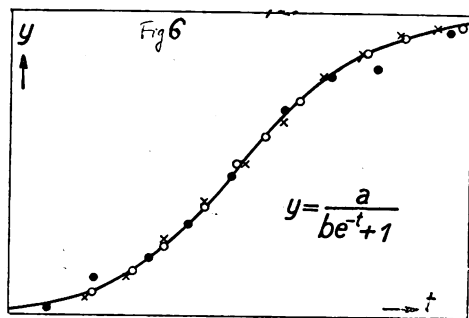


Fig. 6. — Cercles o : établissement du régime permanent d'une triode. points • : développement d'une colonie de mouches. Croix x : croissance d'un tournesol. La courbe en trait plein a une équation de la forme indiquée.

population d'une culture de bactéries ou de parasites se fait suivant la même loi, et enfin la loi de croissance d'un individu d'une espèce donnée, d'un tournesol par exemple, est entièrement analogue. La figure 6 montre ces trois applications d'une même formule. Les petits

(1) ЛОТК, *Elements of Physical Biology*. — Baltimore 1925, p. 66.

cercles représentent les valeurs, relevées expérimentalement dans mon laboratoire, du carré de l'amplitude des oscillations d'une triode au cours de la période d'établissement. Les gros points représentent l'accroissement de population des *drosophyla* et les croix la loi de croissance moyenne d'un tournesol.

La ressemblance intime de ces phénomènes, physiquement si dissemblables, mais mathématiquement analogues, ne saurait être niée. Il est donc très vraisemblable que des problèmes de population plus compliqués, dont la solution analytique serait difficile à obtenir (nous en verrons d'autres exemples par la suite) pourront être résolus expérimentalement en laboratoire à l'aide des oscillations des lampes triodes. Car dès que nous sommes assurés que nos équations représentent correctement un certain problème de population, il est le plus souvent assez simple d'établir un réseau électrique comprenant des lampes et satisfaisant à ces équations, et comme il est beaucoup plus facile d'expérimenter avec des courants électriques qu'avec la matière inerte (sans parler de la matière vivante) la méthode électrique suggérée ci-dessus peut être utilisée avec avantage.

8. — Retournant à l'équation fondamentale (11), qui a d'abord été obtenue à partir d'un circuit oscillant à un seul degré de liberté connecté à un dynatron, il est facile de montrer qu'elle s'applique également au cas d'un oscillateur ordinaire à réaction ; la pratique montre que les oscillations dues à ces deux types de circuits sont tout à fait analogues.

Sans entrer dans les détails mathématiques de ce phénomène, ce qui nous prendrait beaucoup trop de temps, je voudrais mentionner ici une circonstance remarquable qui à ce qu'il me semble n'est pas en général correctement interprétée. Je veux parler des cas où le second membre de l'équation (9), au lieu d'être nul est égal à $A \sin(\omega_1 t + \varphi)$, par exemple lorsqu'un récepteur auquel on a donné trop de réaction, et qui par suite oscille de lui-même, reçoit un signal entretenu. En général on entend le son différentiel bien connu de fréquence angulaire $\omega_1 - \omega$, mais avec un peu d'attention on reconnaît qu'il y a toujours une région voisine de la résonance où ce son différentiel n'est plus entendu ; cela non pas parce que sa fréquence est trop basse, mais tout simplement parce qu'il a disparu. La raison pour laquelle ce son a disparu peut être cherchée par le calcul, et on trouve qu'elle provient de ce fait, que l'oscillation forcée cause un affaiblis-

sement de l'oscillation libre, au point qu'au voisinage de la résonance l'oscillation libre a complètement cessé d'exister. Il est clair que ce phénomène est intimement lié à la présence du terme *non linéaire* dans les équations (9) ou (1), et n'est possible que parce que le principe de superposition dont nous avons l'habitude, cesse de s'appliquer à des systèmes non linéaires. Ainsi, bien que la fréquence des oscillations libres soit légèrement influencée par les oscillations forcées, c'est principalement l'action de l'oscillation forcée sur l'*amplitude* de l'oscillation libre, qui est la cause de cette « zone de silence » particulière.

Il faut remarquer de plus que dans cette zone de silence, l'amplitude de l'oscillation forcée peut atteindre une valeur très élevée, ce qui n'est pas autre chose que le phénomène bien connu de la résonance. Par suite le système défini par les équations (9) ou (11) avec la condition $\varepsilon^2 \ll 1$, c'est-à-dire avec un incrément initial très petit, présente d'une part une résonance très aiguë et d'autre part une région très étroite qu'on pourrait appeler de « synchronisation automatique ». Nous devons avoir ces faits présents à l'esprit lorsque nous étudierons l'action d'une force extérieure périodique sur un système à relaxation.

Deuxième Conférence

9. — Dans la première conférence nous avons discuté en détail l'allure de la solution de l'équation

$$v'' - (\alpha - 3\gamma v^2)v' + \omega^2 v = 0 \quad (9)$$

or, ce qui revient au même,

$$y'' - \epsilon(1 - y^2)y' + y = 0 \quad (11)$$

mais seulement dans l'hypothèse

$$\epsilon = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{\delta}{\pi} \gg 1 \quad (16)$$

c'est-à-dire en supposant l'incrément initial suffisamment petit pour que, dans l'expression de la fréquence, la correction quadratique provenant du terme résistance soit négligeable. Nous avons montré que dans ces conditions l'amplitude des oscillations sinusoidales commençait par croître exponentiellement, puis ensuite approchait asymptotiquement de la valeur 2.

Aujourd'hui nous considérerons l'aspect opposé de ces équations, c'est-à-dire que nous examinerons l'hypothèse

$$\epsilon^2 \gg 1. \quad (33)$$

Comme nous l'avons déjà remarqué au cours de la discussion précédente, si le terme non linéaire $3\gamma v^2$ était absent de l'équation (9) — ou le terme $\epsilon\gamma^2$ absent de l'équation (11), — c'est-à-dire si nous nous trouvions dans le cas linéaire, la condition $\epsilon^2 \gg 1$ signifierait simplement que nous avons affaire au type *apériodique* de l'équation linéaire du second ordre à coefficients constants. Mais l'apériodicité dans le cas actuel diffère considérablement de l'apériodicité dans le cas classique, car dans ce dernier elle provient soit d'une grande résistance série r (fig. 1) soit d'une petite résistance shunt R (fig. 2). Au contraire dans le cas actuel elle provient soit d'une grande résistance série *négative* r , soit d'une petite résistance shunt *négative* R . Ceci est bien conforme à ce que nous disions alors, à savoir qu'un grand *décroissement négatif*, ou, ce qui est la même chose, un grand *incrément positif*, est tout aussi apte qu'une résistance positive à produire l'apériodicité.

Il y a encore une autre différence très grande entre le cas apériodique à résistance négative, et celui à résistance positive : c'est que dans ce dernier cas la position d'équilibre

$$\gamma = 0 \quad (34)$$

est *stable*, alors qu'avec une résistance négative elle est *instable*. Il en résulte que même en supposant $\epsilon^2 \gg 1$, le système ne pourra pratique-

ment pas rester au repos, mais s'écartera de sa position d'équilibre instable suivant une loi exponentielle. D'un autre côté il est clair que lorsque y^2 sera plus grand que 1, le système se comportera comme s'il contenait une résistance positive. Par suite il aura tendance à revenir vers $y=0$, mais dès que y^2 sera devenu plus petit que 1, le système commencera à recevoir de l'énergie, puisque sa résistance sera redevenue négative. Nous voyons donc que pour des raisons physiques, la solution de l'équation (11) peut, même dans l'hypothèse $\varepsilon^2 \gg 1$, être périodique, mais nous voyons aussi qu'elle aura une allure toute différente de celle que nous avons reconnue pour le cas $\varepsilon^2 \gg 1$ où nous avons obtenu une solution asymptotique sinusoïdale ayant même période que le système libre non amorti.

10. — La solution de (11) dans le cas $\varepsilon^2 \ll 1$ n'a malheureusement pas encore été trouvée sous forme explicite, mais on peut en obtenir une représentation graphique sans trop de difficulté.

A cet effet nous poserons

$$y' = z \quad (33)$$

ce qui change l'équation (11) en

$$\frac{dz}{dy} - \varepsilon(1 - y^2) + \frac{y}{z} = 0. \quad (36)$$

Dessignons dans le plan des y, z , une famille d'*isoclynes*, c'est-à-dire de courbes joignant les points pour lesquels $\frac{dz}{dy}$ a une même valeur C_1 . L'équation d'une isoclyne est en vertu de (36)

$$C_1 - \varepsilon(1 - y^2) + \frac{y}{z} = 0.$$

Il est facile d'en tracer un certain nombre dans le plan (z, y) , et l'on indiquera ensuite au moyen d'un petit segment de droite la direction que doit avoir une courbe intégrale de (11) lorsqu'elle coupe une isoclyne. (Cette direction, tout le long de l'isoclyne C_1 , a la pente C_1 .) Il s'agira ensuite de tracer les courbes intégrales, en reliant bout à bout ces petits segments de droites et en se laissant guider par le sentiment de la continuité. C'est ce que l'on a fait sur le graphique que reproduit la fig. 7 pour la valeur $\varepsilon^2=0,1$. La fig. 8 correspond à $\varepsilon=1$, et la fig. 9 à $\varepsilon=10$.

On remarque sur chacune de ces trois figures une courbe intégrale fermée ; c'est un exemple de ce que Henri POINCARÉ a appelé un *cycle limite*, parce que les courbes intégrales voisines s'en approchent asymp-

totiquement. Dans le cas de $\varepsilon=10$ que l'on peut appeler *quasi-apériodique*, le cycle limite, qui correspond à une solution périodique de (11), est pratiquement atteint au bout d'un tour seulement.

11. — Les intégrales premières $z=f(y)$ ayant ainsi été obtenues, il est aisé d'en déduire par la même méthode les intégrales $y=f(t)$ de

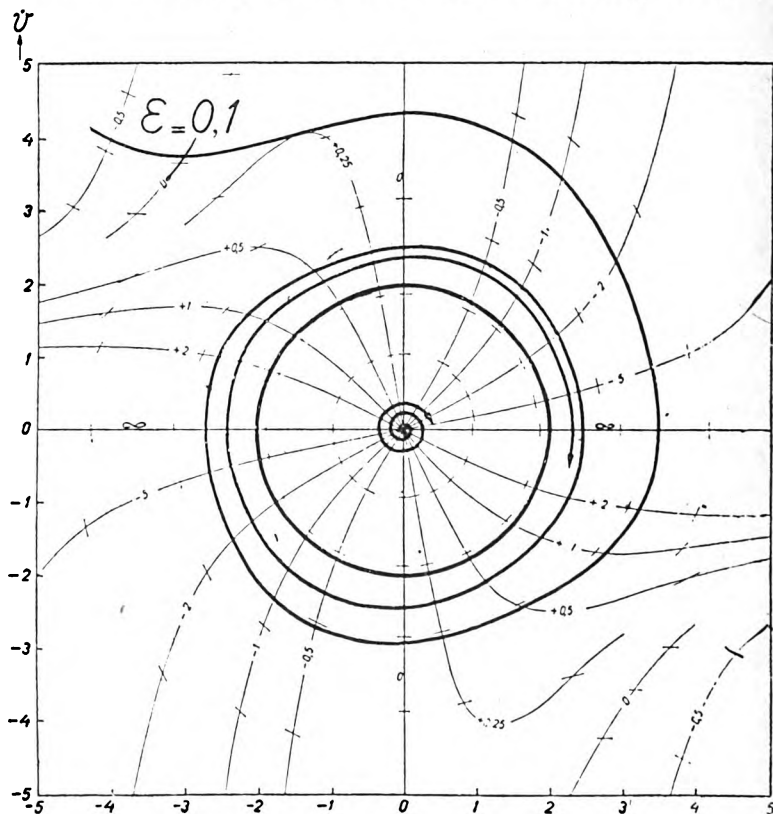
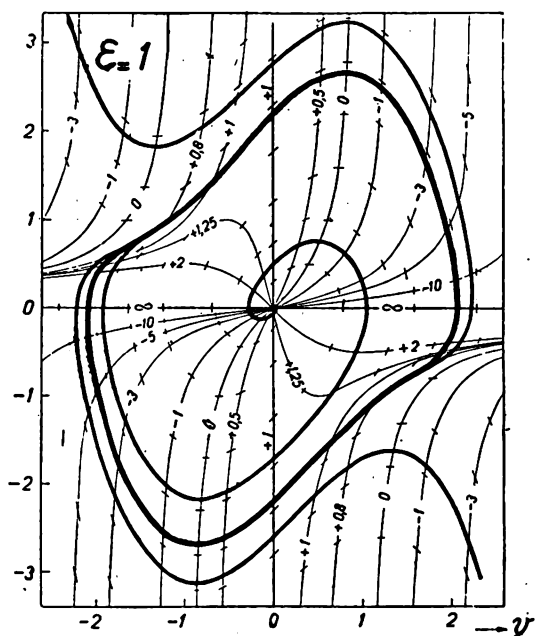
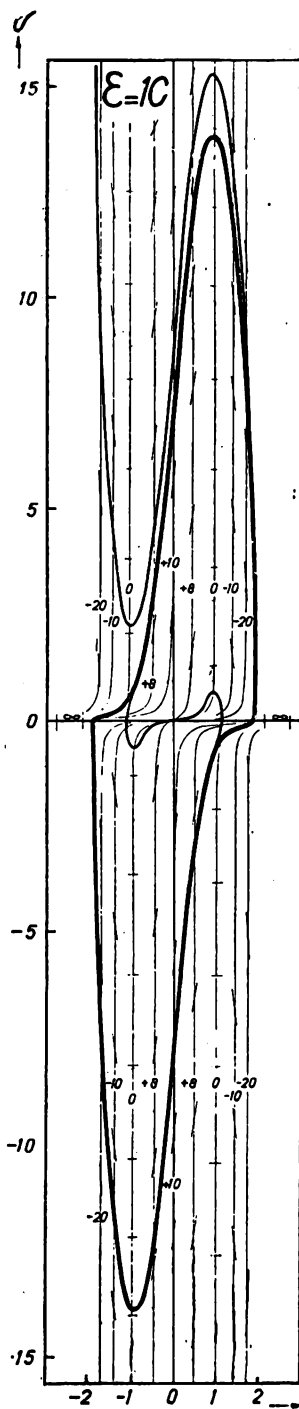


Fig. 7. — Courbes intégrales de l'équation $\frac{dz}{dy} - \varepsilon(1-y^2) + \frac{z}{y} = 0$ dans le cas de ε très petit. Dans cette figure comme dans les deux suivantes, on remarquera l'existence d'une courbe intégrale fermée (cycle limite).

l'équation (11). La figure 10 représente les résultats obtenus dans les trois cas

$$\varepsilon = 0,1 \quad \varepsilon = 1 \quad \varepsilon = 10.$$

La première courbe ($\varepsilon=0,1$, *incrément petit*) aurait pu être construite à partir de la formule $\frac{\sin(t+\gamma)}{\sqrt{1+Ce^{-t}}}$, et la comparaison des résultats numériques des deux méthodes montre un accord satisfaisant.

Fig. 8. — Cas intermédiaire de $\varepsilon=1$.Fig. 9. — Cas extrême de ε très grand.

Nous avons affaire ici à une oscillation sinusoïdale d'amplitude croissante, tendant asymptotiquement vers la valeur 2. La fréquence angulaire est égale à 1 pour l'équation (11) en unités absolues.

La deuxième courbe ($\epsilon=1$) a une allure semblable, mais ici l'amplitude finale est atteinte au bout d'un plus petit nombre d'oscillations, et l'on peut déjà observer une déviation assez sensible de la forme sinusoïdale.

La troisième courbe ($\epsilon=10$) est particulièrement intéressante. Ici, on observe que la courbe commence par s'élever exponentiellement,

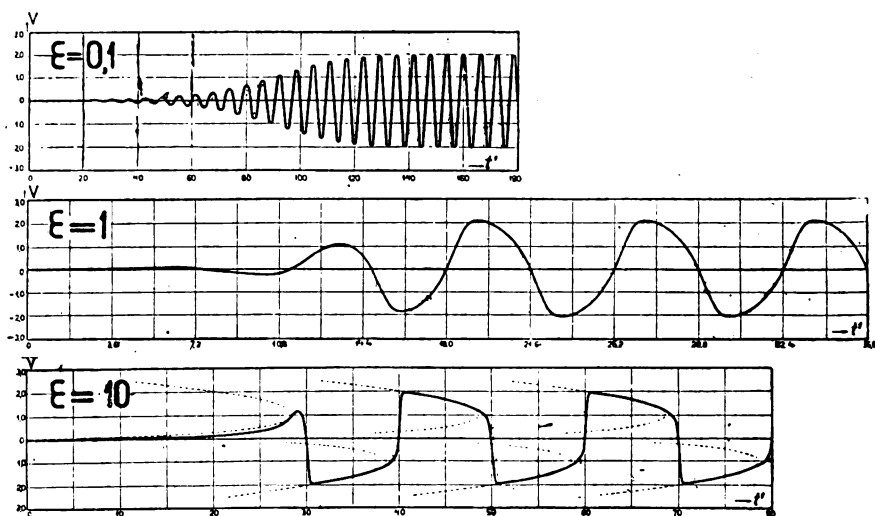


Fig. 10. — Oscillations de relaxation, ou courbes intégrales de l'équation $y'' - \epsilon(t+y^2)y' - y = 0$

pour ϵ très petit on a une courbe voisine d'une sinusoïde obtenue après une longue période d'établissement.

Pour ϵ très grand on a une courbe différant beaucoup d'une sinusoïde obtenue pratiquement au bout d'une seule période. La courbe du milieu représente un cas intermédiaire.

et au bout d'une durée égale à une période, a déjà pratiquement atteint sa forme périodique limite. Cette forme périodique, correspondant au régime permanent, diffère très fortement de la forme sinusoïdale. Nous voyons que la courbe baisse d'abord lentement de $+2$ à $+1$; puis elle tombe très rapidement de $+1$ à -2 ; pendant la seconde moitié de la période elle croît d'abord lentement de -2 à -1 , puis s'élève très rapidement de -1 à $+2$. Le même cycle se reproduit ensuite indéfiniment.

Il est manifeste que cette forme d'oscillation contient beaucoup d'harmoniques élevés d'amplitude notable, ou en d'autres termes que

la série de Fourier correspondante converge très lentement, comme le montre la figure 11.

On peut voir de plus que la période T , qui était égale à 2π , lorsque $\varepsilon^2 \gg 1$, augmente en même temps que ε et, lorsque $\varepsilon^2 \gg 1$, devient de l'ordre de ε lui-même ; on a, en effet, dans ce cas, en première approximation,

$$T_{\text{rel.}} = (3 - \log_e 4) \varepsilon - 1,61\varepsilon = 2\pi \cdot \frac{1}{4} \varepsilon.$$

12. — Examinons d'un peu plus près quelles sont les grandeurs physiques qui déterminent la période T . Si l'équation (11) représente le

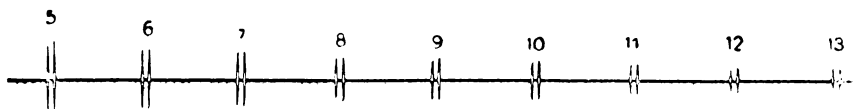


Fig. 11. — Amplitudes des harmoniques successifs contenus dans une oscillation de relaxation, relevées expérimentalement. On a superposé à l'oscillation à analyser une oscillation sinusoïdale de fréquence variable et on a enregistré le courant circulant dans un circuit voisin très peu amorti, de fréquence propre de 40 p : s.

mouvement de l'électricité dans un système formé d'une résistance, d'une inductance L et d'une capacité C en série, nous avons les relations habituelles

$$\alpha = \frac{r}{L}, \quad \omega^2 = \frac{1}{LC}.$$

Nous avons trouvé que la période relative à la nouvelle variable temps t' était

$$T = 1,61\varepsilon \quad [\omega t = t'].$$

Pour exprimer cette quantité en fonction de l'unité de temps habituelle il suffit d'exprimer T en fonction des constantes du circuit d'où

$$T = 1,61 \frac{\alpha}{\omega^2} = 1,61 \cdot Cr. \quad (37)$$

Dans le cas, obtenu par dualité, où C , R et L sont en parallèle, on obtient de la même manière

$$T = 1,61 \frac{z}{\omega^2} = 1,61 \frac{L}{R}.$$

La période T se trouve donc dépendre de la constante de temps Cr qui caractérise la décharge d'un condensateur C dans une résistance r . Je demande la permission de conserver, pour désigner cette constante de temps l'expression « *durée de relaxation* » qui m'est habituelle, et d'appeler ce type d'oscillations périodiques, dont la forme diffère essentiellement de la forme sinusoïdale et dont la période est une durée de relaxation, des *oscillations de relaxation*.

Comme on rencontre des phénomènes de décharge dans des domaines variés des sciences physiques et naturelles, il est clair que les oscillations de relaxation correspondantes, dont la période dépend d'une durée de relaxation et dont nous avons fourni le prototype au cours des considérations précédentes, doivent être aussi fort répandues. Nous pouvons prévoir qu'un caractère original de ces oscillations consistera en ce que leur période ne conservera pas une valeur aussi rigide-ment constante que la période d'une oscillation sinusoïdale. Cette dernière, en effet, dépend du produit d'une masse et d'un coefficient de raideur, ou encore d'un coefficient de self-induction et d'une capacité, et en général d'un couple de grandeurs analogues qui ne sont pas aisément influencées par les circonstances extérieures. Une durée de relaxation au contraire, dépend du produit d'une grandeur du type précédent et d'une grandeur du type résistance qui est d'un caractère tout différent, provenant de phénomènes tels que le *frottement mécanique*, la *résistance électrique*, la *viscosité des fluides*, le *rayonnement d'une surface*, les *chocs mutuels des molécules ou des ions*, etc... Tous ces phénomènes sont aisément influencés par les circonstances extérieures, entendant par là des grandeurs qui ne figurent pas parmi celles qui ont servi à mettre le problème en équation sous la forme (11) : telles seront suivant les cas : la *température*, l'*état de propreté des surfaces*, les *vibrations des supports*, le *degré d'ionisation*, etc... L'observation montre que les oscillations de relaxation naturelles sont fréquemment sujettes à des changements de fréquence subits et irréguliers, qui doivent être attribués à la cause que nous venons de dire.

13. — Une oscillation de relaxation a lieu, d'une manière générale, toutes les fois qu'un mécanisme, contenant une source d'énergie continue, permet à un phénomène essentiellement apériodique de se répéter automatiquement un nombre indéfini de fois. Un grand nombre de phénomènes des plus familiers rentrent dans ce schéma, par exemple : le grattement d'un couteau sur une assiette, le grincement

d'un tiroir ou d'un porte, le claquement d'un drapeau, le chant d'une bouilloire, d'un tuyau de distribution d'eau, la ligne pointillée qu'on peut faire à la craie sur un tableau noir, etc.

Le sifflement du vent dans les cordages d'un navire et le chant des fils télégraphiques ont été expliqués par STROUHALL et LORD RAYLEIGH comme provenant de la formation successive de part et d'autre du fil d'une série infinie de tourbillons alternés. La hauteur du son est ici déterminée par la vitesse du vent et par le diamètre du fil ⁽¹⁾.

Dans le domaine électrique nous avons de très jolis exemples d'oscillations de relaxation dont certains sont très anciens, telles que la décharge par étincelles d'une machine à plateaux, l'oscillation de l'arc électrique, étudiée par M. BLONDEL dans un mémoire célèbre ⁽²⁾ ou l'expérience de M. JANET, et d'autres plus récentes, telles que le multivibrateur d'ABRAHAM et BLOCH ⁽³⁾ qui consiste en un amplificateur à couplage capacité et résistance à deux étages, dont les bornes de sortie sont connectées aux bornes d'entrée.

Si l'on forme l'équation différentielle relative à un multivibrateur symétrique en ne tenant compte que des résistances et des capacités, on trouve que l'équation ainsi obtenue n'admet pas de solution périodique. Si toutefois on tient compte des petites capacités grille-plaque des triodes, ou de l'inductance qui est toujours présente dans les conducteurs, et qu'on néglige les courants de grille, on obtient l'équation non linéaire (11) ; par suite, cette équation fondamentale représente également le fonctionnement du multi-vibrateur.

Lorsque nous avons obtenu la théorie complète montrant la manière dont les oscillations sont entretenues dans le multivibrateur d'Abraham et Bloch en raison de la présence du premier terme y'' dans notre équation (11), il a été facile de construire un autre multivibrateur ne contenant qu'un seul tube : le multivibrateur à tétrode ⁽⁴⁾ (fig. 12).

Nous trouvons d'autres exemples d'oscillations de relaxation dans l'interrupteur de WEHNELT, ou dans la décharge périodique d'un tube à néon (fig. 13), ou dans les oscillations d'un dynatron (fig. 14).

Dans l'expérience bien connue de M. JANET, une dynamo-série tournant à vitesse constante fournit l'excitation d'un moteur à courant

(1) v. H. A. Lorentz. les sons de la harpe éolienne *ap.* Mélanges W. Mengelberg Nijhoff, La Haye. 1920.

(2) Blondel, *Ecl. Electr.* 44, 41, 81. 1905, v. aussi *J. de Phys.*, 8, 153, 1919

(3) Abraham et Bloch, *Ann. d. Phys.* 12, 237, 1919.

(4) Van der Pol. *Phil. Mag.* 2. 978. 1926.

continu. On sait que ce moteur tourne d'abord dans un sens, puis dans l'autre et ainsi de suite indéfiniment, de sorte que la polarité de la dynamo-série change périodiquement. Si, au lieu de débiter dans l'induit du moteur, la dynamo série est connectée à un grand condensateur (de quelques centaines de microfarads), le renversement automatique de polarité de la dynamo se produit de la même manière, parce

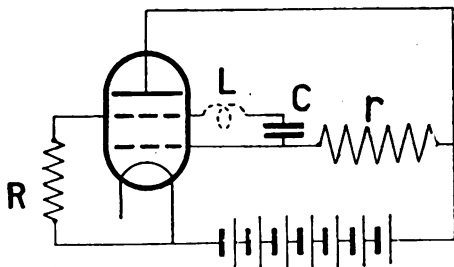


Fig. 12. — Multivibrateur à tétrode. En rendant L de plus en plus petit vis-à-vis de CRr , on obtient une oscillation de plus en plus riche en harmoniques.

qu'un moteur continu à excitation séparée, se comporte exactement comme une grande capacité.

La figure 15 contient trois courbes, la première montrant un oscillogramme de l'expérience de M. JANET prise dans notre laboratoire à EINDHOVEN, la seconde donnant la solution de l'équation (11) que nous

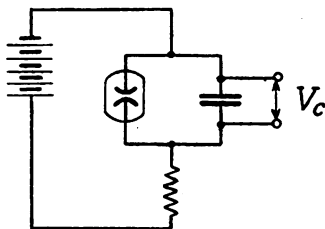


Fig. 13. — Eclats périodiques d'un tube à néon. La batterie charge lentement le condensateur à travers la résistance; le condensateur se décharge dans le tube à néon lorsque la tension à ses bornes atteint une valeur déterminée.

avons discutée ci-dessus et la troisième donnant un oscillogramme du multivibrateur sans courant de grille également relevé à EINDHOVEN. La grande ressemblance de ces trois courbes montre clairement que l'équation (11) suffit à représenter ces deux phénomènes en apparence si différents : l'expérience de M. JANET et le multivibrateur de MM. ABRAHAM et BLOCH. Il est même possible de faire l'étude quantitative de ces

deux phénomènes, en les considérant comme des oscillations de relaxation.

On emploie pour la publicité lumineuse un genre de lampe dans la douille de laquelle on a placé une petite lame bimétallique, entourée

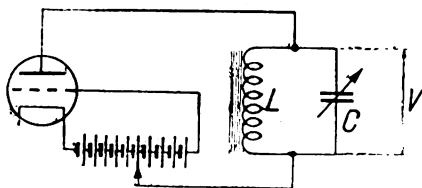


Fig. 14a. — Dynatron monté en générateur d'oscillations.

par une spirale chauffante. Lorsque cette spirale est parcourue par le courant qui se rend ensuite dans le filament, la lame bimétallique se courbe et rompt un contact. C'est donc ici une durée d'échauffement qui détermine la période de l'oscillation de relaxation.

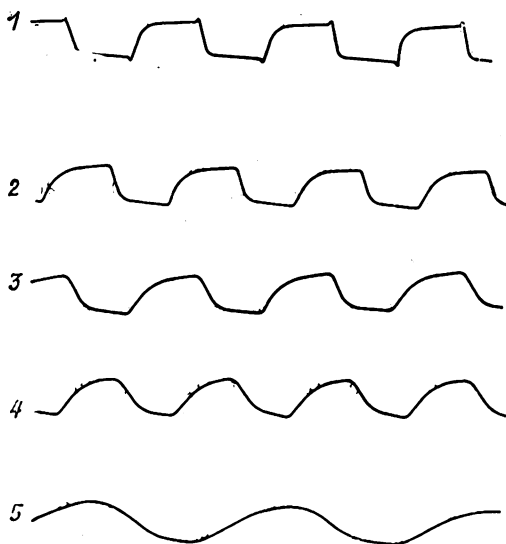


Fig. 14b. — Variations de la tension V aux bornes du condensateur variable C de la fig. 14a. Les courbes 1 à 5 ont été obtenues pour les valeurs suivantes de C : 1 : $0,47\mu\text{F}$ — 2 : $0,16\mu\text{F}$ — 3 : $0,05\mu\text{F}$ — 4 : $0,02\mu\text{F}$ — 5 : $5\,000\text{ cm}$.

Les météorologistes connaissent bien le phénomène des averses périodiques qui se produisent derrière une dépression. Toutes les heures environ le ciel se couvre, une averse a lieu, à la suite de laquelle le ciel s'éclaircit ; un peu plus tard il se couvre de nouveau et le même phéno-

mène se répète à plusieurs reprises. On peut donner une théorie de ce phénomène en s'appuyant sur l'instabilité périodique des couches chaudes de l'atmosphère.

14. — En biologie également, soit parmi les problèmes statistiques, soit parmi les problèmes dynamiques, il est possible de trouver de nombreux exemples d'oscillations de relaxation. Tels sont le retour périodique des épidémies, le problème de parasitologie traité par LOTKA, le problème des poissons de VOLTERRA. Ce dernier problème peut s'exposer comme il suit : Considérons dans la mer une certaine

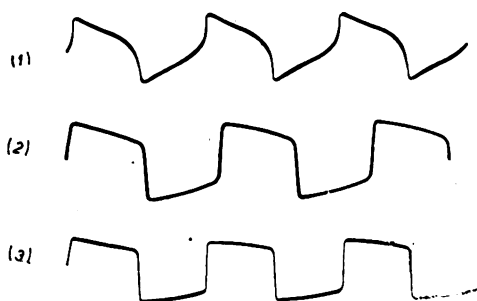


Fig. 15. — Courbe 1: oscillogramme du courant d'une dynamo dont la polarité se renverse périodiquement (fréquence de l'ordre de 1 p: s).
 Courbe 2 (théorique): oscillation de relaxation.
 Courbe 3: oscillogramme du courant d'un multivibrateur (fréquence de l'ordre de 1 000 p: s).
 La similarité des trois courbes est frappante.

espèce de poissons, mettons des soles. On suppose qu'il existe de la nourriture en quantité indéfinie pour ces soles ; si elles existaient seules, leur nombre augmenterait indéfiniment. Mais supposons de plus qu'il existe dans la même mer une seconde espèce de poissons, disons des requins (nous ne donnons ces noms de soles et de requins que pour fixer les idées). Supposons de plus que la seule nourriture de ces requins soit les soles ; de sorte que, si les soles étaient absentes, le nombre des requins diminuerait suivant une loi exponentielle en raison du manque de nourriture et l'espèce s'éteindrait complètement au bout de quelque temps. LOTKA ⁽¹⁾ et VOLTERRA ⁽²⁾ ont cherché à étudier les variations du nombre des soles et du nombre des requins en fonc-

(1) Lotka, *loc. cit.*, p.

(2) V. Volterra, Journ. du Conseil Internat. pour l'Exploration de la Mer, vol. III, n° 1, 1928.

tion du temps et ils ont posé les équations différentielles qui correspondent à ce problème. Sans vouloir entrer dans l'analyse mathématique de la question, il est facile de se rendre compte de ce qui va se passer. Tout d'abord, les requins dévoreront une grande quantité de soles. Le nombre des soles diminuera donc rapidement et au bout de quelque temps les requins trouveront difficilement de la nourriture. En conséquence, un certain nombre de requins mourront d'inanition, à la suite de quoi les soles recommenceront à se multiplier en raison du nombre relativement faible de leurs ennemis. A ce moment il y aura pour le petit nombre de requins restants, une nourriture extrêmement abondante, de sorte que les requins pourront se multiplier aux dépens des soles. Le même cycle se reproduira ensuite indéfiniment.

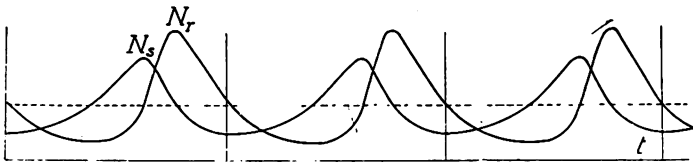


Fig. 16. — Variation de la population de deux espèces animales dont l'une se nourrit de l'autre. Les variations de l'espèce mangeante N_r sont en retard d'un quart de période sur celle de l'espèce mangée N_s .

La figure 16 montre une représentation graphique faite par VOLTERRA à partir des équations différentielles de N_s , nombre de soles, et de N_r , nombre de requins, en fonction du temps ; on voit que chacune de ces deux courbes périodiques croît assez lentement et décroît ensuite plus rapidement ; la courbe N_s présente une certaine avance de phase par rapport à la courbe N_r . La période de ce phénomène est une fonction de deux durées de relaxation, savoir, la durée nécessaire pour que le nombre des soles et le nombre des requins, existant séparément, soient modifiés dans le rapport e .

On a même vérifié expérimentalement des conséquences de l'étude mathématique de ce phénomène, qui paraissaient paradoxales au premier abord.

D'autres exemples d'oscillations de relaxation en biologie sont donnés par le frisson de la fièvre, le claquement des dents, les battements du cœur, le sommeil des fleurs et d'une manière générale les mouvements nyctinastiques des feuilles et des fleurs.

15. — Considérons maintenant plus en détail les propriétés des oscillations de relaxation. En parlant des oscillations sinusoïdales, nous

avons observé qu'une force périodique extérieure peut changer l'amplitude des oscillations d'un système sinusoïdal d'une manière très prononcée, particulièrement lorsque sa fréquence se trouve au voisinage de l'oscillation libre du système. Ceci n'est pas autre chose que le phénomène bien connu de la résonance.

Avec des oscillations de relaxation, par contre, le phénomène est tout différent, comme le montre l'expérience très simple suivante d'où la résonance est complètement absente. Disposons sous un robinet un petit appareil constitué par un réservoir à deux compartiments, pouvant basculer autour d'un axe horizontal et retenu de chaque côté par un butoir d'arrêt. Le réservoir étant d'abord appuyé sur le butoir de gauche, le compartiment de droite se remplit d'eau peu à peu. Quand l'eau atteint un certain niveau le réservoir bascule, le compartiment de droite se vide et le compartiment de gauche qui se trouve maintenant placé sous le robinet se remplit à son tour. Lorsqu'il est plein, le réservoir bascule en sens inverse et le cycle recommence. La période du phénomène dépend d'une durée de remplissage, laquelle à son tour est un quotient des deux facteurs, le volume du réservoir (qui joue le rôle d'une inductance L) et le débit du robinet (jouant le rôle d'une résistance R).

Si maintenant le débit de l'eau n'est pas constant, mais que le robinet soit ouvert périodiquement chaque seconde pendant un temps très court, de sorte qu'une petite quantité d'eau tombe périodiquement dans le réservoir d'une manière discontinue, à la sixième ouverture du robinet, par exemple, le récipient se renversera et par conséquent à la douzième ouverture basculera de nouveau en sens inverse, et ainsi de suite. Le basculement a lieu seulement lorsque la quantité d'eau versée dans le réservoir rend celui-ci instable. Nous voyons donc qu'il n'est pas possible d'agir sur l'amplitude de l'oscillation de relaxation en changeant la période de la fourniture de l'eau, puisque cette amplitude est toujours déterminée par un même niveau de l'eau à l'intérieur du réservoir. Toutefois, nous remarquons que le système sera exactement *synchronisé* avec un *sous-harmonique* de la période de la fourniture de l'eau ; dans l'exemple choisi, avec le sixième sous-harmonique ⁽¹⁾.

(1) Strictement parlant nous n'avons pas ici un exemple de force extérieure périodique, mais de variation périodique de la résistance. Le phénomène est toutefois le même dans les deux cas, et c'est pourquoi l'exemple ci-dessus a été choisi, en raison de sa simplicité.

Nous voyons par l'exemple ci-dessus, qu'en opposition complète avec ce qui se produit dans les systèmes sinusoïdaux, la *période d'un système à relaxation* peut être aisément influencée par les circonstances extérieures, alors que ces mêmes circonstances ne peuvent pratiquement rien sur leur *amplitude*.

Nous avons de plus ici un exemple de *démultiplication de fréquence*, c'est-à-dire que le basculement du réservoir se produit périodiquement après un intervalle de temps qui est un multiple entier de l'intervalle séparant deux ouvertures du robinet ; la *période de l'effet est ainsi un multiple de la période de la cause*. La fréquence de l'effet est une fraction simple, (un demi, un tiers, un quart, etc...) de celle de la cause et nous avons donc affaire à un phénomène de *démultiplication de fréquence*.

Il résulte d'expériences faites dans notre laboratoire à Eindhoven ⁽¹⁾ qu'on peut aisément, au moyen d'oscillations de relaxation électriques, obtenir une démultiplication de fréquence de l'ordre de 200 : 1. Par ce procédé on a pu, par exemple, réduire suffisamment la fréquence d'oscillations sinusoïdales de haute fréquence, pour leur faire conduire un petit moteur asynchrone et actionner une horloge.

Le principe de la démultiplication de fréquence a été appliqué à la mesure de fréquences radios par MM. HULL et CLAPP ⁽²⁾ et par M. DECAUX ⁽³⁾. Signalons également une expérience de ECCLES et Miss LEYSHON ⁽⁴⁾, dans laquelle le circuit d'une lampe à néon exécutant des oscillations de relaxation, était couplé magnétiquement avec un diapason. Cette expérience fournit un joli exemple de la facilité avec laquelle les oscillations de relaxation ajustent leur fréquence sur celle d'une force périodique extérieure. En effet, ces physiciens ont trouvé que si l'on rendait d'abord la période de l'oscillation de relaxation approximativement égale à celle du diapason, celui-ci se mettrait à vibrer énergiquement, et par la suite il était possible de faire varier la période propre du système à relaxation dans des limites très étendues sans que le système entier cesse de vibrer à la fréquence du diapason. Dans cet exemple le mécanisme de l'entretien est fourni par une oscillation de relaxation, mais, ce qui est caractéristique du couplage d'un

(1) Van der Pol et van der Mark. Nature 10 sept. 1927.

(2) Hull et Clapp. Proc. Inst. Radio Eng. 17, 252, 1929.

(3) Decaux, Onde Electr., 8, 325, 1929.

(4) Eccles et Miss Leyshon. Electricien. 97, 65, 1926.

système de relaxation avec un système sinusoïdal, la *fréquence* est déterminée par celle du système sinusoïdal.

On peut comparer cette expérience au fonctionnement d'un tuyau d'orgue. Le courant d'air arrivant sur l'anche produit une oscillation de relaxation, mais nous avons, couplé d'une manière serrée avec ce système à relaxation, le tuyau lui-même qui ne peut vibrer que sinusoïdalement ; c'est ce dernier qui ici encore détermine la fréquence, tandis que l'entretien de la vibration est dû au système à relaxation.

Nous voyons donc en résumé que le phénomène de la résonance qui nous est si familier avec des systèmes sinusoïdaux manque complètement dans les systèmes à relaxation.

16. — Nous avons déjà mentionné tout à l'heure le battement du cœur comme un exemple caractéristique d'oscillation de relaxation. En collaboration avec M. VAN DER MARK, j'ai construit un modèle

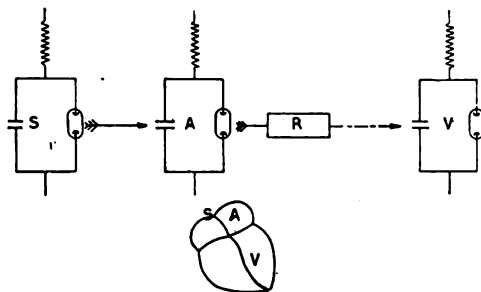


Fig. 17. — Représentation schématique du cœur par trois systèmes de relaxation : S (Sinus), A (Oreillette), V (Ventricule). R. est un réseau retardateur.

électrique du cœur ⁽¹⁾ qui comprend trois systèmes à relaxation représentant respectivement le sinus, les oreillettes et les ventricules (fig. 17). A l'aide de ce modèle, diverses anomalies bien connues du rythme du cœur ont pu être reproduites et quelques anomalies nouvelles ont pu être prédites. Le modèle est particulièrement commode pour donner des électrocardiogrammes que l'on peut comparer à ceux relevés sur le corps humain. Le phénomène bien connu du blocage à 2/1 et 3/1, ainsi que le blocage complet, sont parfaitement reproduits par ce modèle. Dans le cœur humain c'est le ventricule qui bat avec une fré-

(1) Onde Electr. 7, 365, 1928.

quence de la moitié ou du tiers de la fréquence de l'oreillette et par suite dans le blocage partiel nous avons un excellent exemple de la propriété que nous avons signalée tout à l'heure des oscillations de relaxation, à savoir la possibilité d'obtenir une démultiplication de fréquence.

Si nous donnons de l'extérieur une petite impulsion électrique à notre modèle, de la même manière qu'on peut le faire sur des cœurs de grenouille par exemple, ou bien le modèle ne réagira pas du tout (c'est le phénomène dit de la *période réfractaire*) ou bien la lampe à néon donnera un éclat et le condensateur se déchargera avec son amplitude normale. C'est également ce que l'on observe sur le cœur de grenouille, qui tantôt ne réagit pas du tout et tantôt donne une extra-systole complète. Ceci n'est qu'un exemple de la propriété dont nous parlions tout à l'heure qu'une force extérieure peut changer la *PÉRIODE* mais non pas l'*AMPLITUDE* d'une oscillation de relaxation. Cette propriété est connue en physiologie sous le nom de *loi de Bowditch* ou loi du *tout ou rien*. La figure 18 montre des extra-systoles du ventricule où l'on peut voir que l'amplitude de l'extra-systole est pratiquement la même que celle des systoles normales.

17. — Nous avons déjà signalé parmi les exemples d'oscillations de relaxation le sommeil des fleurs. Vous avez tous observé que la pâquerette ferme ses pétales dans la soirée pour les ouvrir de nouveau le matin suivant. Beaucoup de fleurs présentent ce phénomène périodique et les feuilles exécutent parfois aussi un mouvement analogue avec une période de 24 heures. Depuis plus de cent ans, on a essayé de trouver la cause de ces mouvements nyctinastiques. Le phénomène était bien connu de LINNÉ et il a même proposé de l'utiliser pour faire fonctionner une horloge. Comme cause de ce mouvement, certains auteurs indiquaient l'influence de la température sur les plantes ; vous savez par exemple que des tulipes, placées dans une chambre chauffée, s'ouvrent largement. On a pensé également à la conductibilité électrique de l'air, laquelle montre une fluctuation d'une période de 24 heures. On a pensé aussi à l'influence bien connue de la lumière sur l'attitude des plantes, etc.

A côté de ces théories qui tendaient à expliquer le phénomène par des influences extérieures, d'autres théories ont été également proposées, qui donnaient ces mouvements comme autonomes ou *intrinsèques*, c'est-à-dire que les plantes auraient acquis dans la suite des

temps un rythme *intérieur* de 24 heures. Il y a peu de temps, des recherches détaillées sur ce sujet ont été publiées par Mlle KLEINHOONTE dans une thèse ⁽¹⁾ d'où la figure 19 a été extraite. Cette figure montre très nettement le mouvement vertical des feuilles pendant une période de 24 heures, lorsqu'elles sont soumises à l'illumination naturelle. L'auteur a observé que les plantes placées dans l'obscurité, ou bien sous une lumière parfaitement constante, donc non périodique, con-

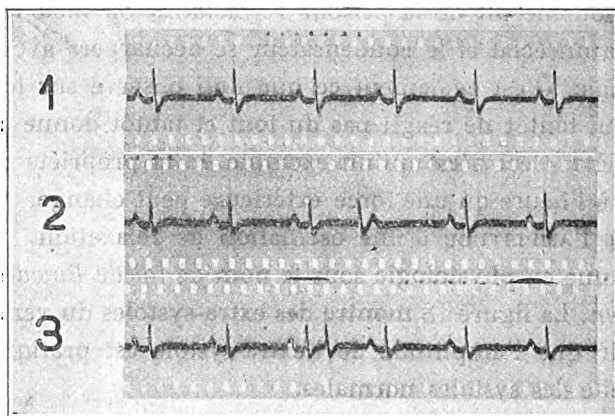


Fig. 18. — Extrasystoles ventriculaires :

1. Rythme normal.
2. Extrasystole ventriculaire tardive ayant pour effet que le ventricule est encore réfractaire à l'arrivée de la première excitation suivante provenant de l'oreillette.
3. Extrasystole ventriculaire se produisant *peu de temps* après une systole ventriculaire normale; ici la période réfractaire du ventricule est terminée quand le premier stimulus normal suivant arrive de l'oreillette et on obtient donc une systole ventriculaire interpolée.

tinuaient à se mouvoir avec une période d'environ 24 heures, dont la phase par rapport à l'heure de la journée pouvait prendre toutes les valeurs possibles. Une influence régulatrice de la température, de la conductivité ou de la lumière étant ainsi complètement exclue, il devient manifeste que ces mouvements peuvent être considérés comme des oscillations de relaxation dont la période est déterminée par une durée de la nature d'une durée de diffusion, puisqu'une action de masse est ici hors de question.

(1) Mej. A. Kleinhoonte. De door het licht geregelte autonome bewegingen der *Canavalia* bladeren. — Delft, 1928.

Il résulte de diverses observations, décrites dans la thèse de Mlle KLEINHOONTE, que si l'on soumet la plante à une illumination périodique avec une période de 12 heures, ou encore avec une période de 6 heures, la plante continue à avoir un mouvement périodique d'une période de 24 heures. Nous avons donc ici un exemple remarquable de démultiplication de fréquence dans les rapports de 2 à 1 et de 4 à 1.

Il est non moins remarquable que l'amplitude du mouvement des feuilles dans le cas de démultiplication de fréquence, est exactement la même que dans le cas de l'oscillation libre de la plante, c'est-à-dire dans le cas de l'oscillation de relaxation sans force extérieure présente.

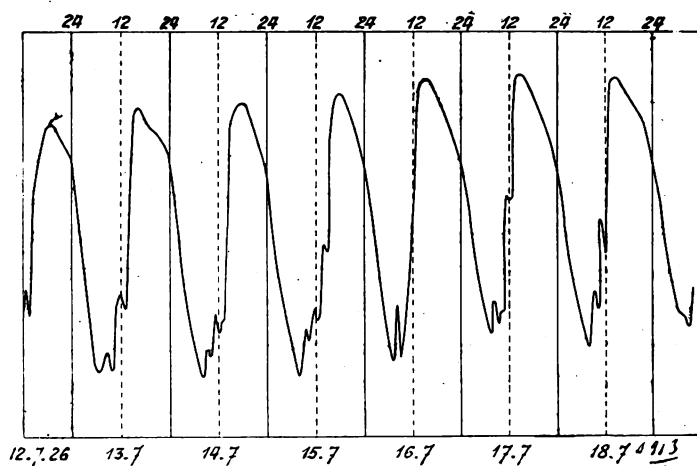


Fig. 19. — Le sommeil des plantes est encore une oscillation. La courbe ci-dessus montre le mouvement diurne d'une feuille de *Canavalia*).

Nous trouvons donc ici une parfaite analogie avec la loi du *tout ou rien* pour le cœur humain.

La conclusion est donc que ces phénomènes nyctinastiques rentrent absolument dans le type des oscillations de relaxation. Les plantes en question ont leur propre fréquence, qui toutefois peut s'ajuster facilement à une illumination périodique extérieure ; bien que l'énergie nécessaire au mouvement soit fournie par la plante elle-même, la période est réglée par une influence extérieure très petite qui ne fournit pratiquement aucune énergie au système.

18. — Nous mentionnerons pour terminer un très important travail du Dr L. HAMBURGER dans un ordre d'idées tout différent, intitulé « une nouvelle méthode de recherches concernant les cycles écono-

miques et une nouvelle manière de les traiter » ⁽¹⁾. Ce travail développe des considérations très intéressantes sur les fluctuations économiques (*business cycles*). De même que pour le sommeil des plantes, beaucoup de travaux ont été publiés sur la question de savoir si la périodicité dans la vie économique est due à une cause interne ou si elle est causée par des influences extérieures. Il y a par exemple une théorie qui cherche dans les variations périodiques de la pluie, d'une période de onze ans, la cause des oscillations économiques. D'autres auteurs au contraire croient plutôt à des causes internes. Le phénomène lui-même peut être décrit en gros comme il suit : Après une dépression économique, la situation s'améliore lentement et progressivement jusqu'à ce qu'à un moment donné, une situation brillante soit atteinte qui présente un caractère d'instabilité, à ce moment la chute se produit, la situation empire et descend rapidement jusqu'à son minimum. Le phénomène se reproduit ensuite périodiquement, mais les périodes peuvent différer considérablement entre elles, de 2 à 10 années par exemple, bien qu'en moyenne la période soit environ de 3 ou 4 ans.

En ce moment, nous sommes, vous le savez, dans un minimum assez marqué.

Nous avons déjà remarqué à plusieurs reprises que c'est une caractéristique des oscillations de relaxation que leur fréquence peut aisément être influencée, mais non leur amplitude. Le Dr HAMBURGER a également trouvé en discutant les travaux statistiques publiés sur les cycles économiques que les amplitudes des fluctuations (corrigées de leurs variations de longue période), sont beaucoup plus constantes que les périodes elles-mêmes. Il arrive ainsi à la conclusion suivante : « *Je suis d'avis que seule la conception des cycles économiques comme des oscillations de relaxation peut donner une base rationnelle et suffisante pour une explication de ces importants phénomènes.* »

J'ajoute toutefois qu'en cette matière, le dernier mot n'a certes pas été dit et que de nombreuses questions sont toujours sujettes à discussion.

*
**

Il aurait été intéressant d'entrer plus en détail dans l'analyse mathématique de certains des systèmes à relaxation dont j'ai parlé au cours

(1) De Economist, Janvier 1930.

de ces deux conférences, mais le lecteur pourra s'il le désire se reporter pour cela à certaines de mes publications antérieures ⁽¹⁾. J'ai cru préférable, vu l'espace dont je disposais, de donner une idée de la variété des phénomènes que l'on peut rattacher à ce type général. J'espère avoir ainsi montré comment l'étude des principes mathématiques qui gouvernent un mode de fonctionnement très général dans la nature, conduit à relier entre eux un grand nombre de phénomènes particuliers qui paraissent, à première vue, étrangers les uns aux autres.

(1) Van der Pol Ztsch. f. Hochfreq. techn. 28, 178, 1926 et 29, 114, 1927.

LES PROGRÈS RÉCENTS DE L'EMPLOI DU FOUR ÉLECTRIQUE EN ACIÉRIE ⁽¹⁾

par M. Albert LEVASSEUR

Ingénieur-Conseil, Conférencier à l'Ecole Supérieure d'Electricité

L'auteur fait connaître l'évolution récente de l'aciérie électrique et montre combien sont erronées quelques-unes des opinions qui ont parfois cours à ce sujet. Après avoir exposé certains principes métallurgiques, défini exactement le rôle des diverses sortes d'appareils et fourni différentes données numériques, il indique toute l'importance des progrès réalisés depuis peu dans la construction des fours, et il insiste sur le fait que l'effort de l'électricien ne peut être fécond que s'il place au premier plan de ses préoccupations les desiderata du métallurgiste. Les principaux problèmes de l'aciérie électrique sont, en conséquence, discutés avec précision et la communication ci-après constitue en quelque sorte une « mise au point » de l'état actuel de cette branche de l'électrometallurgie.

I. — Introduction. — En quoi l'aciérie électrique consiste-t-elle ? Légende et réalité

Chacun sait qu'en sidérurgie classique, l'acier est obtenu par la décarburation de la fonte, l'instrument de fabrication étant ordinairement le convertisseur ou le four Martin. La première pensée des électrometallurgistes devait donc être de préparer l'acier électrique par un processus analogue, c'est-à-dire en décarburant la fonte. Cette méthode fut bientôt reléguée au second plan. Mais l'idée fautive de sa prépondérance se propagea, de compilation en compilation, jusqu'à ces derniers temps, et on la rencontre encore quelquefois dans les milieux scientifiques peu familiers de la métallurgie. Il convient donc, avant tout exposé, de rétablir la réalité des faits :

Dans la plupart des cas, l'acier électrique est fabriqué non à partir de fonte, mais à partir d'acier.

Voilà qui semblera, peut-être, paradoxal. Tout étonnement disparaîtra dès qu'on saura que le prix des fontes est, en France par exemple, de 450 à 650 francs la tonne suivant la qualité, tandis qu'on peut se procurer en abondance des riblons d'acier et notamment des tournures à 200 francs la tonne ou même à beaucoup moins (ces prix étant

(1) Cette communication présentée à la séance du 22 mars 1930 de la 3^e Section, sous la Présidence de M. Charles Marie sera présentée et discutée au cours de la Semaine de discussions de 1930, le 25 novembre prochain.

les moyennes grossièrement approximatives des cours des récentes années).

La fusion des riblons au four électrique à arc a deux buts qui sont, le plus souvent, poursuivis simultanément :

a) Transformation d'un métal médiocre en acier de qualité supérieure.

b) Obtention directe de celui-ci sous les formes définitives d'utilisation ; en d'autres termes, fabrication de pièces moulées.

Le problème de l'aciérie électrique se présente d'une manière un peu différente pour les usines qui préparent elles-mêmes la fonte à partir du minerai. Deux solutions peuvent alors être envisagées, l'une d'elles consistant à introduire dans le four électrique la fonte liquide provenant du haut-fourneau (ou du mélangeur) et à la transformer en acier, l'autre consistant à décarburer la fonte dans un convertisseur ou dans un four Martin, puis à faire passer l'acier obtenu dans un four électrique destiné seulement à servir de correcteur.

De ces deux solutions, c'est la seconde qui, généralement, est la meilleure. En effet, le four électrique n'a aucune aptitude particulière pour décarburer (ni, par conséquent, pour déphosphorer, puisque la déphosphoration exige une décarburation très poussée). Or, ces opérations peuvent être très bien effectuées au convertisseur, et cela d'une manière économique. Mais le convertisseur se prête mal à la désoxydation parfaite et à la désulfuration, opérations que le four électrique (à arc) réalise à merveille. Une marche rationnelle consistera donc à obtenir au convertisseur de l'acier déphosphoré mais oxydé, puis à verser ce métal dans un four à arcs où l'on effectuera la désoxydation et la désulfuration, *la consommation d'énergie électrique étant ainsi réduite à une valeur très minime* ⁽¹⁾. — De même, le four électrique pourra corriger le métal provenant d'un four Martin.

On voit, en fin de compte, qu'ici encore, c'est à partir d'acier et non pas de fonte que l'acier électrique est préparé.

Pour terminer, nous rappellerons que le four électrique est utilisé dans la fabrication des aciers spéciaux. C'est là, d'ailleurs, que les fours à induction d'aciérie peuvent trouver leurs principales applications.

(1) Cette dépense d'énergie sera d'autant moindre, pécuniairement, que ce sont les gaz du haut-fourneau qui, dans le cas supposé, fourniront les kilowatt-heures.

Résumons ce préambule. *L'aciérie électrique réalise surtout trois sortes d'opérations* ⁽²⁾ :

1° *Fabrication d'acier fin à partir de ferrailles quelconques, par exemple de tournures.*

2° *Correction de l'acier liquide provenant de convertisseurs ou de fours Martin.*

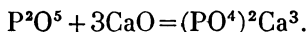
3° *Préparation d'aciers spéciaux.*

II. — Exemple d'une opération. — Principes métallurgiques

Il serait impossible de comparer avec fruit les appareils électriques et non électriques, ou de discuter les qualités respectives des fours à arc et des fours à induction, si certains principes métallurgiques n'étaient d'abord nettement explicités. Nous commencerons, dans ce but, par décrire sommairement une opération, ce qui fixera opportunément les idées.

Imaginons, ce qui est un cas très fréquent, qu'on veuille obtenir de l'acier fin à partir de riblons quelconques, ferrailles, tournures, etc. La fabrication pourra s'effectuer suivant la marche que voici :

1° Chargement des riblons, de chaux et d'oxyde de fer (minerai ou battitures). Amorçage des arcs et fusion. — L'oxyde de fer transforme alors le phosphore en P^2O^5 et celui-ci se combine à la chaux pour donner un phosphate qui surnage sous forme de scorie ⁽³⁾ :



Décrassage du bain pour éliminer définitivement le phosphore.

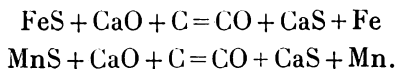
2° Il y a eu, pendant l'opération 1°, oxydation du carbone de l'acier et oxydation du métal lui-même ; la teneur en carbone de celui-ci est devenue inférieure à 0,1 p. 100. Le décrassage étant terminé on jette, par exemple, à la surface du bain des morceaux de carbone pur (tels que des débris d'électrodes) ; une partie de ce carbone brûle, une autre partie désoxyde le fer, une troisième partie recarbone le métal.

On achève la désoxydation de celui-ci en ajoutant une petite quantité de ferro-silicium.

(2) La plus fréquente, après celles qui sont énumérées ici, consiste dans l'obtention de l'acier à partir de riblons de fer et de fonte liquide.

(3) Lorsqu'on veut préparer des aciers très fins, on forme parfois deux laitiers basiques oxydants. Le premier est très riche en oxyde de fer et le second est ultra-basique (on l'additionne parfois d'un peu de CaF^2 pour le fluidifier). Le premier laitier enlève surtout le manganèse et le silicium, et le second enlève le phosphore qui restait.

3° On jette sur l'acier liquide de la chaux (additionnée d'un peu de spath-fluor, pour accroître la fluidité du laitier) et l'on redonne le courant (interrompu depuis le commencement du décrassage) ; de temps en temps, on ajoute encore du carbone. Le soufre du métal passe dans le laitier, à l'état de sulfure de calcium (4) :



4° Additions finales et coulées.

L'ensemble des opérations ci-dessus dure ordinairement de deux à six heures (selon l'importance de l'affinage à effectuer, la valeur plus ou moins élevée du taux de puissance, etc.)

Bien entendu, la marche qui vient d'être décrite n'est pas la seule qui puisse être employée. On rencontre dans l'industrie d'assez nombreuses variantes.

De ce qui précède, nous déduirons surtout la règle suivante :

Tandis que la déphosphoration s'effectue avec un laitier basique oxydant, la désulfuration se réalise avec un laitier basique, mais dans des conditions réductrices. Les conséquences du dernier fait sont ici d'importance capitale.

III. — Comparaison du convertisseur, du four Martin du creuset à flammes et du four à arc

1° POINT DE VUE PUREMENT MÉTALLURGIQUE.

a) Des quatre appareils précités, un seul, le four à arc, est capable de désulfurer sérieusement.

Cela résulte en partie de ce qui vient d'être dit. L'atmosphère d'un four Martin, par exemple, est fatalement oxydante. Au contraire, un four à arc peut avoir une atmosphère réductrice ou, tout au moins, presque neutre.

Ajoutons que, malgré toutes les précautions, la flàmme d'un four Martin est toujours quelque peu sulfureuse, d'où une certaine contamination du métal.

Enfin, la faculté de porter le laitier à bonne température contribue largement, dans les fours à arc, à favoriser la désulfuration.

(4) Alors que le laitier de déphosphoration était noir (à cause de l'oxyde de fer), le dernier laitier ci-dessus est blanc (d'où les appellations de « scorie noire » et « scorie blanche »).

On objectera peut-être, à ce qui a été indiqué en premier lieu, que le creuset à flammes *a*, lui aussi, une atmosphère sensiblement neutre dès qu'ont été absorbées les traces initiales d'oxygène. Mais le « creuset » ne permet de réaliser aucun affinage. Il n'est rien qu'un moyen de fusion et il ne fournit un produit pur, exempt de soufre et de phosphore, qu'à condition que les matières chargées aient possédé, elles-mêmes, une égale pureté.

b) L'acier obtenu au four à arc ou au « creuset » contient beaucoup moins de traces résiduelles d'oxydes que l'acier obtenu au convertisseur ou même au four Martin.

c) L'acier préparé au four à arc ou au creuset contient, aussi, bien moins de gaz occlus que celui qui provient du four Martin ou surtout du convertisseur ⁽⁵⁾.

Les supériorités *b* et *c* de l'acier électrique ne résultent pas seulement d'une question d'atmosphère, mais aussi, relativement à l'acier de convertissage, du mode d'élaboration du métal. Rappelons que les convertisseurs ne fournissent, à cause du soufflage, qu'un produit renfermant en émulsion des scories et des gaz (lesquels peuvent, d'ailleurs, être éliminés en grande partie par une décantation prolongée).

d) La source de chaleur étant, au four électrique comme au four Martin, indépendante des réactions internes, l'opération peut être conduite avec plus de liberté qu'au convertisseur. L'élaboration est d'ailleurs assez lente pour qu'on ait le temps de prélever des éprouvettes, de les essayer, de rectifier le bain, etc. Il est donc facile d'obtenir très exactement l'acier de la nuance demandée.

2° POINT DE VUE DE LA MOULIERIE D'ACIER.

Nous ne nous occuperons pas ici du creuset à flammes, celui-ci n'étant plus utilisé, pour la fonderie, que dans des cas particuliers.

a) Le four Martin fournit généralement un métal trop froid pour l'obtention satisfaisante des pièces de faibles dimensions, ou qui présentent des parties minces, ou dont la forme est compliquée. — L'insuffisance de la température est, par ailleurs, un obstacle matériel à la coulée d'un grand nombre de petites pièces, en raison de la durée d'un pareil travail.

(5) D'une manière générale, la densité des aciers électriques est supérieure à celle des aciers Martin, Bessemer ou Thomas.

Seuls, le convertisseur (acide) ⁽⁶⁾ et le four électrique sont capables de fournir l'acier à la température la plus favorable.

Signalons encore que les masselottes des moulages coulés au four électrique peuvent être diminuées sans inconvénients. Les lingots sont très compacts, et, si la masselotte a été quelque peu calorifugée ⁽⁷⁾, ils ne présentent qu'une faible retassure, à tel point que la chute de tête peut être réduite de plus de moitié.

b) Le four Martin manque totalement de souplesse d'utilisation. Il produit régulièrement un certain nombre de tonnes de métal dont il faut avoir l'emploi immédiat, ce qui n'a lieu que dans peu de fonderies.

Seuls, le four électrique et le convertisseur peuvent être adaptés, pour ce qui est des quantités produites, aux besoins variables de l'usine.

En résumé, on voit que les outils *normaux* du fondeur d'acier ne pourront être que le convertisseur acide ⁽⁸⁾ ou le four électrique. Mais nous avons vu, il y a quelques instants, tous les avantages du second au point de vue métallurgique ; ces avantages se répercutent naturellement sur la qualité des pièces moulées ; ainsi l'expérience montre que l'acier électrique « crique » beaucoup moins que celui obtenu par convertissage.

3° POINT DE VUE ÉCONOMIQUE.

a) La pureté exceptionnelle de l'acier est obtenue au four à arcs, malgré l'emploi d'une charge impure et peu coûteuse, ce qui n'a pas lieu avec le procédé « au creuset ».

b) Il n'est guère possible de charger des tournures ou des riblons de dimensions minimales dans un four Martin, en raison de l'importance qu'y prend la perte au feu lorsque la surface des ferrailles devient très grande par rapport à leur masse.

Même avec de grosses ferrailles, la perte de fusion est notablement plus forte au four Martin qu'au four électrique : elle est encore bien plus élevée au convertisseur. Voici quelques chiffres à ce sujet :

(6) Le convertisseur basique ne donnerait pas un métal assez chaud (ni par conséquent assez fluide) pour qu'on puisse l'utiliser en fonderie.

(7) On prend même soin, parfois, de la chauffer.

(8) C'est le convertisseur Robert, à soufflage latéral, qui est ordinairement utilisé par les mouleries d'acier.

APPAREIL	PERTE AU FEU MOYENNE
Convertisseur	20 pour cent ⁽⁹⁾ .
Four Martin	6 pour cent.
Four électrique	3 pour cent.

c) La dépense de ferro-alliages est d'autant plus faible que l'oxydation est moins intense. Le four électrique a donc là un avantage très net.

d) La dépense de combustible est nulle au convertisseur. Mais il ne faut pas oublier, dans les comparaisons économiques, la dépense nécessitée par la fusion des gueuses au cubilot.

La consommation d'énergie n'est d'ailleurs pas si élevée, au four électrique, qu'on l'imagine quelquefois. Elle dépend, avant tout, de la constitution de la charge, ainsi que le montre le tableau suivant :

NATURE DE LA CHARGE	DÉPENSE D'ÉNERGIE COMPTÉE AU PRIMAIRE ⁽¹⁰⁾ (OBTENTION D'UNE TONNE D'ACIER).
Acier liquide, provenant d'un four Martin ou d'un con- vertisseur	130 kWh
Acier froid	500 à 900 kWh (suivant l'importance de l'affinage).
Fonte liquide et minerais	1 000 kWh

La consommation pourrait être de l'ordre de 1 500 kWh avec une charge constituée par de la fonte solide et du minerais.

Ce tableau appelle quelques observations intéressantes :

1. On voit que la dépense d'énergie varie de près de 1 à 10 suivant la nature de l'opération. Cela suffit à montrer ce qu'il y a de peu rationnel à rapporter, comme cela se fait trop souvent, certaines dépenses, telles que celle d'électrodes, à la tonne d'acier produit, sans prendre soin d'indiquer en même temps la constitution de la charge.

(9) Si, comme c'est un cas très fréquent, le convertisseur est alimenté par un cubilot, il faut en outre tenir compte de ce que la fonte subit, dans ce premier appareil, une perte qui est de l'ordre de 5 à 10 pour cent.

(10) Les pertes électriques dans le transformateur, la ligne basse tension, les contacts, les électrodes, etc., et les pertes calorifiques du four sont évaluées ici, au total, à 30 pour cent, environ, de l'énergie fournie.

Il est à peine besoin de dire que les chiffres donnés ci-dessus ne sont qu'approximatifs et qu'ils varient notablement d'une exploitation à une autre.

Il va de soi que les consommations d'électrodes, de réfractaires, etc., dépendent fondamentalement du nombre de kilowatt-heures dépensés dans le four, et seulement d'une manière indirecte, de la production de celui-ci.

2. Si l'on fait abstraction du cas, négligé ici, où la fabrication s'effectue à partir de riblons de fer et de fonte liquide, on constate que les deux opérations qui consomment le moins d'énergie sont celles qui préparent l'acier électrique à partir d'acier ordinaire, liquide ou solide. Il y a là une considération supplémentaire qui contribue, avec celle du prix des matières premières, à déterminer la prépondérance industrielle des procédés dont nous avons souligné l'intérêt dans l'introduction du présent travail.

L'étude extrêmement sommaire qui vient d'être faite du point de vue économique est visiblement très incomplète. Son seul but était de mettre en lumière quelques-uns des facteurs les plus importants. Nous n'avons pas comparé les capitaux à investir, ni fait le calcul complet des frais d'exploitation. Mais l'étendue qui va être donnée à certains paragraphes plus techniques de cette communication nous interdit d'alourdir davantage l'exposé qui précède. Nous aurons d'ailleurs, dans ce qui va suivre, l'occasion de revenir sur la question des prix de revient.

IV. — Comparaison du four à arc et du four à induction à basse fréquence ⁽¹¹⁾

De tout temps depuis leur apparition, les fours à induction à cadre magnétique ont excité l'enthousiasme des électriciens. Mais les *aciéristes* ⁽¹²⁾ se sont montrés beaucoup plus réservés, et cela à juste titre. En effet, le grand intérêt de l'aciérie électrique réside, ainsi qu'on l'a vu, dans la possibilité d'obtenir, à partir de ferrailles quelconques, un métal de qualité supérieure. Or les fours à induction B. F. (notamment s'ils sont de petite capacité) ne permettent pas d'atteindre de très hautes températures, surtout dans le laitier puisque celui-ci n'est chauffé qu'indirectement. Il résulte de là :

(11) Nous nous sommes largement inspiré, dans ce paragraphe et dans quelques-uns des suivants, d'une communication que nous avons faite, sur un sujet très différent, à l'Association Technique de Fonderie, le 4 mai 1929. Cette communication a été publiée dans le Bulletin de décembre 1929 de la dite Association.

(12) La place prise par le four à induction B. F. est, au contraire, considérable en fonderie d'alliages non ferreux, par exemple en laitonnerie.

- a) Que l'activité chimique du laitier est médiocre.
- b) Que le décrassage est incommode (le laitier étant plus ou moins à l'état pâteux).
- c) Qu'il est parfois difficile d'atteindre la température optimum pour le travail et la coulée de l'acier doux.
- D'autre part :
- d) Le prix d'un four à induction d'un tonnage donné est plus élevé que celui d'un four à arcs (accessoires compris), et sa production est moindre.
- e) Les fours à induction ont un facteur de puissance très inférieur à celui des fours à arc, ce qui se répercute généralement sur le tarif de l'énergie. — Ce désavantage s'accroît très vite à mesure qu'augmente le tonnage. — On peut, il est vrai, y remédier en abaissant la fréquence, mais ce remède est très onéreux.
- f) Enfin, la sujétion d'amorçage implique divers inconvénients évidents.

Par contre, les fours à induction présentent les avantages suivants :

N'ayant pas d'électrodes, ils ont une atmosphère non carburante, ce qui n'est pas le cas des fours à arcs, surtout lorsque ces derniers sont de petit tonnage et que les arcs sont courts. La carburation du bain par les morceaux d'électrodes brisées n'est pas à craindre au four à induction. — Accessoirement, nous ajouterons que le réglage de la température peut être ici très précis.

On voit que le four à induction sera tout indiqué pour l'obtention de certains aciers spéciaux extrêmement peu carburés. En pratique, on est souvent gêné, dans cette fabrication, par la difficulté d'atteindre une température suffisamment élevée, ce qui fait que le four à induction B. F. est souvent employé pour la préparation des aciers fins et durs, du genre de ceux qu'on fond ordinairement au « creuset ».

V. — Les fours à arcs. — Quelques questions controversées. — Perfectionnements divers

Nous ne pourrions faire ici un exposé d'ensemble, fût-il très succinct, de la construction des fours à arcs. L'étude qui va suivre sera donc très lacunaire. Nous nous bornerons à examiner quelques problèmes particulièrement intéressants, mais *qui seront sans aucun lien direct les uns avec les autres.*

ARC LIBRE ET ARC SUR MÉTAL

L'arc libre (c'est-à-dire jaillissant entre les électrodes sans passer par la charge) a ici pour avantages :

- a) La faible valeur de la carburation du bain par les électrodes.
- b) Une assez grande régularité de l'appel de courant, même si le régulateur est imparfait. — Cette régularité résulte, évidemment, de ce que la charge ne fait pas partie du circuit.

Par contre :

- c) On reproche à l'arc libre de ne pas toujours donner une scorie bien fondue et de ne pas produire de point chaud pour l'amorçage des réactions des laitiers.

d) L'arc libre implique, en principe, une moins bonne utilisation de la chaleur que l'arc sur métal. Avec ce dernier système, l'arc jaillit dans une sorte de fosse cylindrique ayant pour fond la surface du bain métallique et, pour parois latérales, le laitier. On conçoit que, dans de telles conditions, l'utilisation de la chaleur soit excellente.

e) La voûte du four, étant directement exposée au rayonnement des arcs, s'use plus rapidement que celle des fours à arc sur métal (le réfractaire étant, naturellement, supposé le même). — Rappelons que, dans les anciens fours Stassano, il avait fallu remplacer les briques de silice par des briques de magnésie.

f) La position en porte-à-faux des électrodes ne va pas sans quelques inconvénients.

Certains des défauts précités peuvent être atténués ou supprimés par des dispositifs judicieux. Nous serions profondément injuste si nous ne signalions, à cette occasion, le four *Rennerfelt* (fig. 1) dont l'ingénieuse conception permet de passer, à volonté, de l'arc libre à l'arc sur métal. Cependant, nous inclinons à penser que cet appareil trouvera son principal débouché en fonderie d'alliages plutôt qu'en aciérie, bien qu'il ait déjà donné, dans ce dernier domaine, des résultats remarquables.

L'arc sur métal a été adopté par la très grande majorité des constructeurs.

ARC TOURNANT

Dans ce système, breveté par M. Evreynoff, la rotation de l'arc est réalisée au moyen d'un bobinage inducteur qui entoure le laboratoire du four, ce bobinage étant généralement mis en série avec l'arc (fig. 2).

Le courant alimentant le four peut être continu ou alternatif, et même polyphasé moyennant certains artifices.

L'emploi d'un arc tournant présente les avantages que voici :

1° Le volume d'un tel arc ⁽¹⁾ étant, pour une puissance donnée,

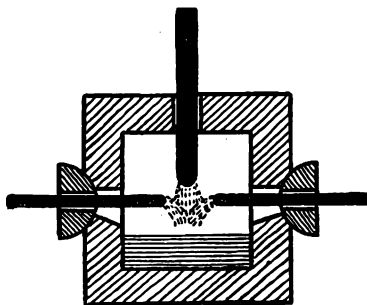


Fig. 1. — Schéma du four Rennerfelt.

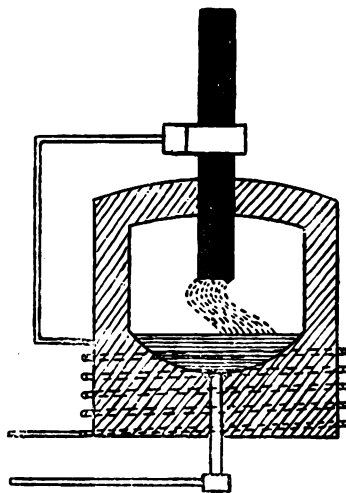


Figure 2.

plus grand que celui d'un arc fixe, sa température moyenne est moindre. Par suite :

a) On pourra, sans détruire le réfractaire, augmenter le taux de puissance du four, ce qui déterminera un accroissement du rendement calorifique ⁽²⁾.

⁽¹⁾ Lequel a la forme d'une hélice conique.

⁽²⁾ Le « taux de puissance » est le rapport de la puissance du four à sa capacité pondérale. L'augmentation de ce rapport améliore le rendement calorifique, puisque les opérations deviennent plus rapides alors que les pertes de chaleur sont proportionnelles au temps.

b) L'augmentation du taux de puissance se réalisant tout naturellement par l'élévation de la tension de l'arc ⁽³⁾, il résultera de ce dernier point une amélioration du rendement électrique.

c) Les électrodes feront leur trou moins rapidement et la fusion sera plus régulière.

2° L'arc tournant est plus stable que l'arc fixe. Il résulte de là :

a) Que la résistance de ballast du circuit extérieur peut être plus faible, d'où un nouvel accroissement du rendement électrique.

b) Qu'on peut, dans certains cas, supprimer la régulation automatique des électrodes.

Voilà ce qu'il est permis, pour l'instant, d'espérer de l'arc tournant ⁽⁴⁾. Mais *il faut attendre, pour porter un jugement sur ce système, que les réalisations industrielles en soient moins rares qu'à l'heure actuelle.*

SOLES CHAUFFANTES

Les fours à arc et à sole chauffante (c'est-à-dire dans lesquels la sole est utilisée comme résistor) sont, si l'on peut dire, à la mode, tout au moins à l'étranger. Parmi les plus connus de ces appareils, il convient de citer les fours *Nathusius*, *Electro-Metals* et *Greaves-Elchells*.

Que faut-il penser de ce système ?

a) Le développement d'une partie de la chaleur dans la région inférieure du bain détermine un brassage qui accélère les réactions.

b) Pour une consommation donnée d'énergie, l'usure de la voûte et la dépense d'électrodes sont moindres que si la sole est isolante. — Mais la sole chauffante doit être fréquemment réparée.

c) Lorsque la marche du four est discontinuë, la sole est, pendant la période de fusion, relativement froide et par conséquent relativement peu conductrice. De là résulte, dans certains fours tels que les *Greaves-Elchells*, une atténuation favorable des chocs électriques produits par les courts-circuits entre une électrode et la sole.

d) Beaucoup de fours à sole chauffante déséquilibrent de façon permanente le réseau triphasé dans lequel ils fonctionnent, et ceux qui ne présentent pas cet inconvénient sont plus compliqués que les fours

(3) La longueur de celui-ci étant accrue.

(4) A ceux des avantages qui résultent de la moindre valeur de la température moyenne de l'arc, nous ajouterions évidemment, si nous avions à parler de la fonderie d'alliages non ferreux, une importante diminution de la perte au feu.

à sole isolante. — Avec tous les systèmes à sole chauffante, des déséquilibres, au moins momentanés, sont inévitables.

On voit qu'il serait difficile, d'après ce qui précède, de formuler ici une conclusion définitive. *Le moins qu'on puisse dire de la sole chauffante est qu'elle est loin de s'imposer, ainsi que le prouve le succès industriel des fours du type Hérault.*

Il va de soi qu'il convient de ne pas confondre les fours à sole chauffante proprement dits avec ceux dans lesquels, par raison de sécurité électrique, une sole conductrice est connectée au point neutre de

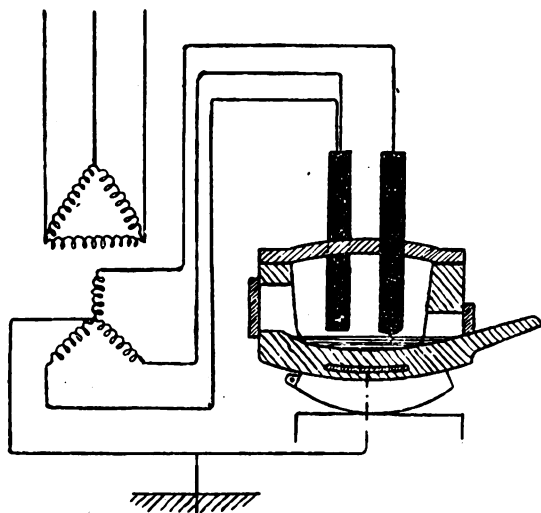


Figure 3.

l'étoile du secondaire du transformateur, bien qu'en pareil cas la sole soit, aux instants de déséquilibre, le siège d'un petit dégagement de chaleur. C'est, par exemple, ce qui est réalisé dans les fours *Fiat* ⁽⁵⁾ (fig. 3).

PERFECTIONNEMENT DU RABOUTAGE DES ÉLECTRODES ⁽⁶⁾

Le raboutage par « nipples » est assez connu pour qu'il ne soit pas nécessaire de le décrire ici. Il a pour inconvénients :

(5) Nous négligeons délibérément de décrire en détail les nombreux fours utilisés en aciérie. On trouvera de telles descriptions, ainsi qu'une documentation étendue sur le calcul, la construction, l'installation et l'emploi des fours dans la 3^e édition de notre ouvrage : « *L'Electrochimie et l'Electrometallurgie* » (Dunod, éditeur).

(6) Les pinces d'électrodes ont également subi des transformations intéressantes. La place nous manque pour traiter cette question dans son ensemble, mais nous donnons ci-contre la disposition d'une pince actuelle (Fig. 4).

a) Une certaine fragilité du joint.

b) La durée relativement grande de l'opération de raboutage.

La Société Française des Electrodes a fait breveter, il y a quelques années, un mode d'assemblage à vis conique, sans goujon rapporté.

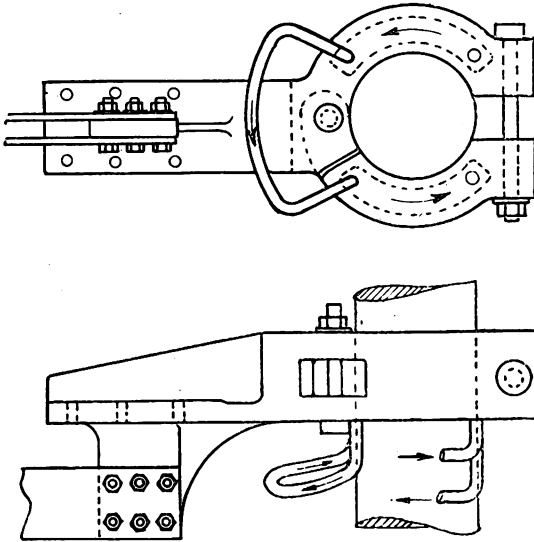


Fig. 4. — Pince des fours Hérault.



Figure 5.

Chaque électrode porte, à l'une de ses extrémités, une saillie filetée conique et, à l'autre extrémité, un trou taraudé conique (fig. 5). Le vissage se fait en $1/3$ de tour seulement, ce qui est évidemment rapide.

Des électrodes à raboutage conique sont également vendues par la Siemens-Planiawerke.

PERFECTIONNEMENTS DES ÉCONOMISEURS

On a soin, à l'endroit où une électrode traverse la voûte d'un four, de disposer une « gaine » (dite encore « collerette » ou « refroidisseur »), pièce métallique entourant l'électrode (mais comportant une coupure magnétique), fixée ou non dans la voûte, et refroidie par une circulation d'eau intérieure. Cette collerette a pour fonctions :

- a) D'éviter ⁽⁷⁾ le frottement de l'électrode contre la voûte.
- b) D'atténuer l'échappement des gaz, et surtout, de les refroidir suffisamment pour qu'ils ne puissent pas faire brûler la partie de l'électrode située hors du four.

En réalité, la gaine ne peut pas entraver sérieusement le passage

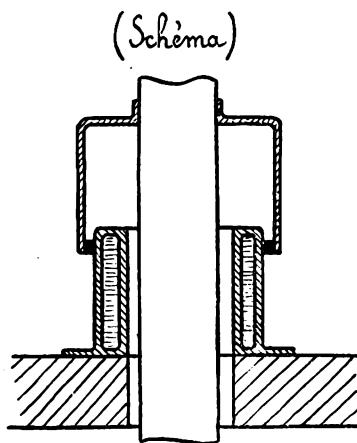


Figure 6.

des gaz, car elle doit avoir une ouverture un peu forte, les électrodes n'ayant pas des diamètres bien constants. De là l'utilité d'adjoindre à la collerette un dispositif d'étanchéité, qui est dit « économiseur » (ou quelquefois « pare-flammes »).

L'importance de cet accessoire est considérable. En effet, si le four n'en est pas muni, il se produit un courant d'air intense allant des portes aux trous de la voûte, ce qui fait que la neutralité de l'atmosphère métallurgique devient complètement illusoire ; de plus, l'usure des électrodes à l'intérieur du four (et même hors de celui-ci) est augmentée, et le rendement électrothermique, diminué.

(7) Si elle est fixée à la voûte au lieu de reposer librement sur celle-ci.

Beaucoup de systèmes d'économiseurs sont la source d'ennuis : étanchéité trop imparfaite, usure rapide de certains accessoires, coincements de l'électrode, etc. Voici des dispositifs plus perfectionnés :

Economiseur Fiat. — C'est une cloche fixée en une région variable de l'électrode et qui coulisse sur une gaine tournée extérieurement (fig. 6).

Economiseur Greaves-Etchells. — Il est disposé sur la gaine et

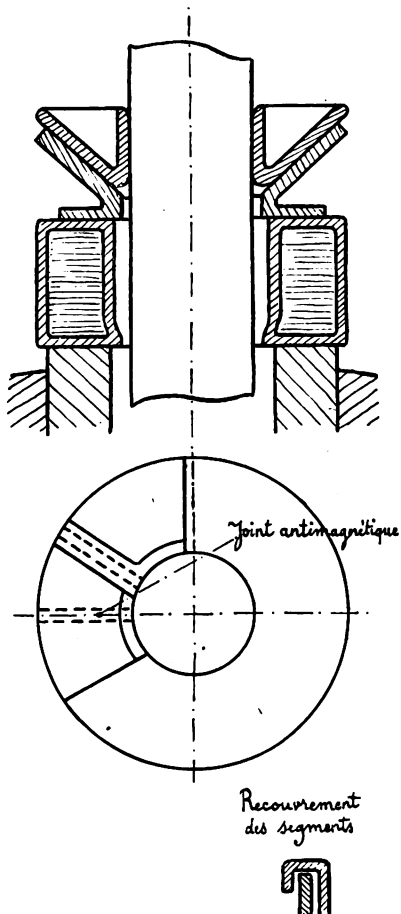


Figure 7.

comporte une pièce de fonte en forme d'entonnoir (munie naturellement d'un joint antimagnétique), dans laquelle sont placés six segments de fonte qui s'emboîtent les uns dans les autres. La pesanteur, en faisant glisser les segments dans l'entonnoir, les applique constamment contre l'électrode (fig. 7).

Les établissements Schneider et Cie qui construisent le four Greaves-Etchells annoncent que l'emploi de cet économiseur réduit de 55 p. 100 l'usure des électrodes.

Economiseur de la Sécomet. — Il se compose d'une couronne A posée librement sur le refroidisseur, sur laquelle sont articulés 12 volets ⁽⁸⁾ B qui viennent s'appuyer contre l'électrode. Les faibles intervalles qui existent entre ces volets sont obturés latéralement par une tresse d'amiante C maintenue par des plats D et formant un joint élastique. Des butées (non représentées sur la figure) empêchent les

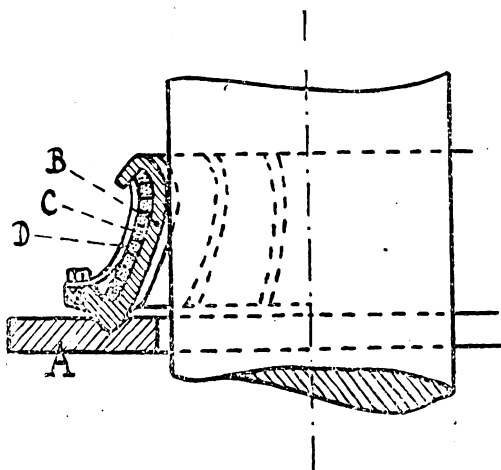


Figure 8.

volets de tomber lorsque l'électrode est enlevée, ce qui permet l'introduction facile des électrodes, même neuves, dans l'économiseur (fig. 8).

Le courant qui traverse l'électrode induit, dans l'économiseur, un flux magnétique qui tend à diminuer la réluctance des entrefers, c'est-à-dire que les volets s'attirent les uns les autres. Chacun des 12 volets se trouve donc soumis à 2 forces faisant entre elles un angle de 150°, et dont la résultante, passant par l'axe de l'électrode, applique fortement le volet contre celle-ci.

L'usager doit avoir, pour chaque four, deux jeux complets d'économiseurs, dont l'un en service et l'autre en réserve. A chaque changement de voûte, on remplace l'appareil en service afin de le nettoyer

(8) Ce nombre n'est donné qu'à titre d'exemple. Le système comporte d'autant plus de volets que le diamètre de l'électrode est plus grand.

et de le réparer (enlèvement des poussières qui gênaient le mouvement des volets et, au besoin, remplacement de la tresse d'amiante et des volets détériorés) ; ces travaux ne demandent pas plus de 2 à 3 heures.

ELECTRODE SÖDERBERG

Ce système n'étant pas encore très connu, nous allons commencer par le décrire brièvement :

Une enveloppe cylindrique, verticale, en tôle, de faible épaisseur ⁽⁹⁾ mais suffisante pour permettre seule le passage du courant, et portant

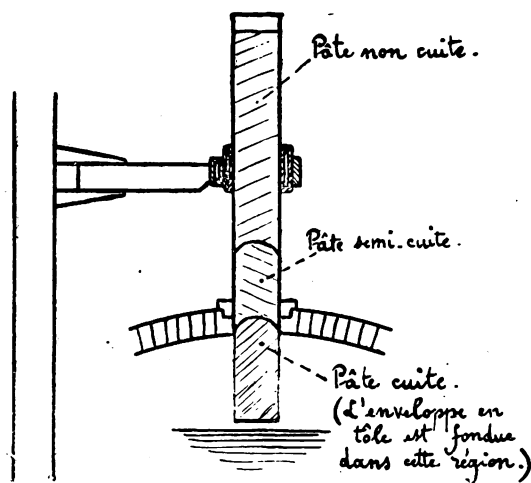


Figure 9.

des nervures intérieures, est serrée au-dessus de la voûte par une pince qui assure à la fois la suspension mécanique et la connexion électrique (fig. 9). Cette enveloppe contient une pâte fluide d'électrodes, que la chaleur perdue par le four cuit peu à peu au-dessous de la connexion. L'enveloppe de tôle fond naturellement au-dessous de la voûte, mais, dans cette même région, la pâte est cuite et possède la conductivité électrique voulue.

Pour compenser l'usure, on fait périodiquement glisser l'électrode d'une certaine longueur à travers la pince, cette opération étant indépendante de la régulation (qui est effectuée de la manière ordinaire).

Lorsque le sommet de l'enveloppe est près d'affleurer la pince, il convient d'allonger l'électrode. Pour cela, on soude à la partie supé-

(9) Un millimètre, par exemple.

rière du cylindre un nouveau tronçon d'enveloppe, ayant par exemple 2 mètres de longueur, et l'on y pilonne, avec des dames pneumatiques, la pâte d'électrodes chauffée vers 90°C.

Cet allongement périodique peut être réalisé de deux façons :

1° Sur le four lui-même, une plate-forme de pilonnage étant disposée au-dessus de celui-ci. La marche de l'appareil est alors continue.

2° Ailleurs que sur le four. — On remplace alors l'électrode devenue trop courte par une autre électrode préalablement allongée. — C'est la solution ordinairement adoptée pour les fours d'aciérie, le changement d'électrode se faisant alors dans l'intervalle de deux fusions.

Examinons maintenant les avantages et les inconvénients du système :

a) Les ruptures d'électrodes sont supprimées. — L'usure par oxydation et la désagréation sont très diminuées.

b) En l'absence d'économiseurs, le joint électrode-refroidisseur est plus étanche qu'avec des électrodes ordinaires.

Cela paraît résulter de ce que les Söderberg peuvent avoir un diamètre bien constant, et surtout de ce que les fumées qui proviennent de la distillation de l'agglomérant de la pâte forment un dépôt entre le refroidisseur et l'électrode.

c) La densité de courant peut, sans inconvénient, atteindre 10 à 12 ampères par cm^2 .

d) Le poids d'électrodes consommé est moindre, et l'emploi des Söderberg est, en fin de compte, économique.

Il convient, par contre, de signaler que le dégagement de gaz et de fumées, dû au chauffage de l'agglomérant, est parfois gênant pour le personnel ; mais cet inconvénient ne se manifeste appréciablement que lors de la mise en marche d'une électrode complètement neuve.

Pour conclure, nous dirons que l'électrode Söderberg constitue un progrès et que son adoption est recommandable dans les grands fours (les avantages du système étant d'autant plus marqués que l'électrode est de plus forte section). Pour les fours de petite capacité, il paraît préférable de s'en tenir aux électrodes ordinaires.

Il est intéressant d'observer, à cet égard, que l'emploi des Söderberg pourra permettre de construire des fours d'aciérie plus puissants que ceux qu'on utilise actuellement.

Voici maintenant comment se présente la question au point de vue commercial :

La Société norvégienne qui possède les procédés, la « *Det Norske Aktieselskab for Elektrokemisk Industri* » d'Oslo a comme représentant exclusif (pour la France et ses colonies, la Belgique et l'Espagne), la *Société des Electrodes de la Savoie*. Celle-ci se charge, à titre onéreux, des études d'installation chez l'aciériste et de la mise en marche du système. Elle se réserve l'exclusivité de la fourniture de la pâte. La Société Norvégienne est rémunérée par une redevance payée par l'usager et calculée sur le tonnage d'électrodes fabriquées selon le procédé (1).

Les brevets français actuels viendront à expiration en 1939.

EVOLUTION DES SYSTÈMES DE BASCULEMENT

En aciérie, le basculement sur tourillons n'est pas très employé et le basculement sur « pivot » tend à disparaître en raison de la grande force motrice qu'il exige. Les basculements sur galets et sur secteurs sont les plus répandus.

a) Le basculement sur galets exige un peu moins de force motrice que celui sur secteurs.

b) Mais ce dernier est plus simple et le plus solide ; c'est lui qui demande le minimum d'entretien.

c) Avec le système à galets, le bec de coulée recule beaucoup vers la fin du basculage, ce qui oblige à avancer continuellement la poche. — Assez fréquemment, on doit, avec ce système, donner une très grande longueur au bec de coulée pour que les chaînes qui tiennent la poche ne viennent pas heurter le four ; il arrive alors que l'ouverture de coulée ne puisse que difficilement servir pour le chargement et, d'autre part, que du métal se solidifie dans le bec, ce qui comporte divers inconvénients.

• Au contraire, avec le système à secteurs, le bec de coulée n'avance que légèrement pendant le basculage. On peut d'ailleurs donner aux secteurs une forme non exactement circulaire et telle que la trajectoire du bec de coulée soit une droite verticale.

(1) Pour les produits autres que l'acier, la redevance est calculée sur le tonnage du produit (ferro-alliage, fonte, etc.).

Le basculement sur secteurs est, en général, le plus recommandable, et il semble d'ailleurs gagner du terrain.

VI. — Les récents progrès de la régulation automatique des fours à arc

Ce titre suffit à indiquer que nous n'étudierons pas, dans son ensemble, la régulation automatique, des fours électriques. Ce sujet a d'ailleurs été traité, ici-même, par M. Mathieu ⁽²⁾ dans une communication tout à fait remarquable, et nous avons fait nous-même, dans une autre enceinte, un exposé assez différent de la même question. Nous allons d'ailleurs emprunter à notre texte d'alors ⁽³⁾ une partie de ce qui va suivre.

EQUATIONS DE RÉGULATION

A chaque type de réglage correspond une équation de régulation qu'on peut discuter indépendamment des modalités de sa réalisation. Cette question est d'importance primordiale ainsi qu'on le verra par ce qui va suivre.

1° *Régulation à tension constante* ($U-A=0$) — La tension étant maintenue constante à la centrale électrique, il faudrait, pour qu'il se produise aux bornes du four une variation de tension assez grande pour être utilisable dans les régulateurs, que l'intensité subisse une très grande variation ; cela serait évidemment inadmissible.

Pourtant, lorsqu'on a deux arcs en série, on peut régler l'un à tension constante, l'autre étant réglé à intensité constante. Cette solution paraît, d'ailleurs, assez peu recommandable.

2° *Régulation à intensité constante* ($I-A=0$). — Ce système sera bon pour un four à arcs libres, tel que ceux du genre Stassano, ou pour un four à un seul arc sur métal (cas des fours Girod monophasés). Mais examinons ce que donne ce mode de régulation dans le cas si important des fours à arcs en série sur métal, tels que les fours Hérault :

a) L'amorçage automatique des arcs ne serait guère possible, car la première électrode venant au contact des riblons à fondre s'y en-

(2) M. Mathieu. — *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, septembre 1927.

(3) A. Levasseur, *loc. cit.*

foncerait exagérément et risquerait de s'y briser (l'intensité étant encore nulle à cet instant puisque, par hypothèse, les autres électrodes ne touchent pas encore la charge dont la hauteur est irrégulière). En outre, du fait même de cet enfoncement, le courant de pointe au moment de l'amorçage serait excessif.

b) Supposons, maintenant, amorcés les deux arcs sur métal d'un four monophasé (4). Leur réglage sera instable car le partage de la tension totale entre ces deux arcs en série est indéterminé.

c) Enfin, il convient de prévoir (5), avec ce mode de régulation, un dispositif supplémentaire destiné à produire le relevage des électrodes en cas de manque de courant (6).

3° *Régulation à puissance constante* ($P-A=0$). — Ce système peut présenter quelque intérêt si le four est monté dans un réseau mal réglé, dont la tension subisse des variations considérables. Alors, grâce à l'équation de régulation choisie, la production du four reste invariable malgré ces changements de la tension d'alimentation.

Mais la régulation à puissance constante a, par ailleurs, toutes les insuffisances que nous avons énumérées au sujet de la régulation à intensité constante. Ce fait devient évident si l'on remarque que, lorsque la tension du réseau est invariable, la constance de la puissance a pour condition la constance de l'intensité, ce qui fait que les deux modes de réglage sont alors doués de propriétés identiques.

4° *Régulation à facteur de puissance constant* ($\cos\varphi-A=0$) (7). — Les variations de la réactance $L\omega$ d'un four électrique sont négligeables relativement aux variations de sa résistance R ; en d'autres termes, $L\omega$ est pour un four donné (8) une quasi-constante. Or on a :

$$\cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}}.$$

Il résulte alors de ce qui vient d'être dit que *la régulation à facteur de puissance constant se confond, pratiquement, avec une régulation à résistance constante.*

(4) On est ramené à ce cas lorsque, dans un four triphasé dont le métal chauffé forme le point neutre, il y a eu extinction de l'un des arcs.

(5) Quel que soit le type du four.

(6) Ce dispositif peut, à la rigueur, être remplacé par un disjoncteur à minima.

(7) Afin de simplifier l'exposé, nous faisons abstraction, dans ce paragraphe, du facteur de puissance propre de l'arc.

(8) Alimenté sous une fréquence déterminée.

La puissance ayant pour expression :

$$P = RI^2 = \frac{RU^2}{R^2 + L^2\omega^2}$$

et les grandeurs $L\omega$ et R étant ici invariables, la puissance varie proportionnellement au carré de la tension d'alimentation, ce qui peut constituer un appréciable inconvénient si le four est monté dans un réseau mal réglé.

Il est vrai que, dans ce cas, le système étudié a pour avantages d'assurer la constance du rendement électrique et parfois de faciliter le relèvement de la tension du réseau ⁽⁹⁾. Mais dans la réalité des circonstances industrielles, ces propriétés n'auraient, le plus souvent, qu'un intérêt minime.

Nous remarquerons, en terminant, que lorsque la tension du réseau est invariable, les régulations à intensité constante et à puissance constante sont, en même temps, des régulations à $\cos \varphi$ constant.

5° *Régulation différentielle (ou à impédance constante)* ($U - AI = 0$). — On a évidemment :

$$A = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}.$$

$L\omega$ étant une quasi-constante, il en est de même de R et, par conséquent, ce mode de réglage se confond avec celui à $\cos \varphi$ constant.

6° *Régulation différentielle à deux constantes*. — Ce système qui présente de très grands avantages et qui est réalisé par les appareils Sécomet-Vastel décrits plus loin a pour équation ⁽¹⁰⁾ :

$$U - AI - B = 0, \quad (1)$$

U étant ici la tension entre l'électrode et la masse et I le courant dans l'électrode.

Admettons (ce que nous vérifierons dans un moment) que, par sa construction, l'appareil réponde aux conditions suivantes :

Si $U - AI - B = 0$, l'électrode reste immobile.

Si $U - AI - B > 0$, l'électrode descend, ce qui augmente I jusqu'à ce que l'équation (1) soit de nouveau satisfaite.

Si $U - AI - B < 0$, l'électrode monte, ce qui diminue I jusqu'à ce que (1) soit de nouveau satisfaite.

(9) Car lorsque U vient à baisser, I diminue proportionnellement, ce qui fait que la puissance réactive $L\omega I^2$ est alors assez faible.

(10) On vérifiera sans peine que ce mode de réglage est à $\cos \varphi$ constant, lorsque la tension U est invariable.

Nous pouvons alors faire les remarques suivantes :

a) Dans le cas des fours du genre Hérault, le système proposé permet l'amorçage automatique des arcs en série, avec une suffisante limitation des pointes de courant.

Cette limitation résulte en partie de ce que, lorsque les électrodes descendent simultanément vers la charge pour l'amorçage, la première électrode qui rencontre un copeau d'acier, par exemple, s'arrête. En effet, à cet instant, on a $I=0$ (puisque les autres électrodes ne touchent pas encore la charge) ; par suite, la formule (1) se réduit à :

$$U-B=0$$

et le mauvais contact actuellement réalisé par le copeau suffit à abaisser assez la valeur de U pour que cette dernière relation (qui assure l'équilibre) soit satisfaite.

b) Lorsqu'il n'y a que deux arcs en série, ils ne sont pas en état d'instabilité.

c) En cas de manque de tension, les électrodes remontent en haut du four, sans qu'il ait été nécessaire d'ajouter pour cela un dispositif supplémentaire. En effet, on a bien dans le cas supposé :

$$U-AI-B<0$$

puisqu'alors :

$$U=0 \text{ et } I=0$$

On remarquera que les avantages signalés en *a* et en *c* ci-dessus résultent de l'introduction de la seconde constante B .

Nous signalerons, pour terminer, que l'équation de régulation (1) convient à tous les cas qui peuvent se présenter : arcs libres et arcs sur métal, fours monophasés et fours polyphasés.

RÉALISATION DE LA RÉGULATION DIFFÉRENTIELLE A DEUX CONSTANTES.

APPAREIL SÉCOMET-VASTEL

Organes essentiels. — Chaque électrode est manœuvrée par un moteur de treuil Mt à courant continu, connecté à une génératrice G dont les inducteurs sont divisés en deux parties égales, u et i , alimentées en opposition (fig. 10).

La tension U entre l'électrode et la masse influence la partie u des inducteurs, par l'intermédiaire du redresseur Ru à lampes Tungal montées de manière à utiliser les deux ondes du courant.

Le courant I qui parcourt l'électrode influence la partie i des inducteurs, par l'intermédiaire du transformateur d'intensité Ti et du redresseur Ri à lampes Tungal montées comme les précédentes.

Cette partie i reçoit en outre un courant débité par l'excitatrice E . Les machines E et G sont commandées par le moteur triphasé M .

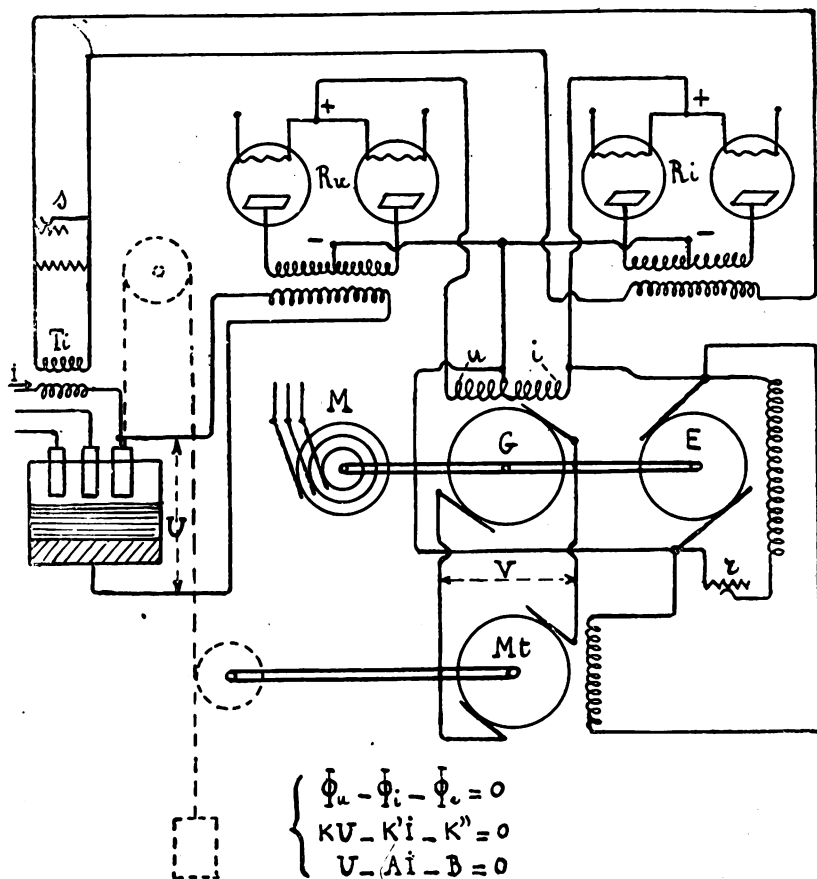


Figure 10.

Fonctionnement. — Lorsque la tension V aux bornes de G est nulle, on a (en désignant par Φ_u , Φ_i et Φ_e les flux magnétiques d'excitation qui résultent des actions de U , de I et de E) :

$$\Phi_u - \Phi_i - \Phi_e = 0,$$

ce qu'on peut écrire, en désignant par K , K' et K'' des constantes ⁽¹¹⁾ :

(11) L'invariabilité de ces facteurs n'est évidemment admissible que par une approximation assez grossière.

$$KU - k'I - K'' = 0$$

ou

$$U - AI - B = 0 \quad (1)$$

On reconnaît ici l'équation de régulation dont nous avons montré plus haut les grands avantages.

Lorsque cette équation (1) est satisfaite, Mt ne tourne pas (puisque $V=0$) et l'électrode reste immobile.

L'électrode descend si :

$$U - AI - B > 0$$

et elle monte si :

$$U - AI - B < 0.$$

Nous ferons ici deux remarques :

a) On peut voir aisément que la tension V aux bornes de G est donnée, dans tous les cas, par une relation de la forme :

$$V = C(U - AI - B).$$

Il résulte de là que la vitesse de rotation de Mt et, par suite, la vitesse de déplacement de l'électrode, sont proportionnelles à $U - AI - B$, c'est-à-dire à la perturbation à corriger.

b) Dès que $U - AI - B = 0$, c'est-à-dire dès que la perturbation est supprimée, on a $V=0$ et le moteur Mt est énergiquement freiné car, s'il continuait à tourner, il fonctionnerait avec récupération électrique d'énergie.

Un semblable freinage empêche Mt de tourner à une vitesse plus grande que celle qui correspond à la valeur de la perturbation à l'instant considéré.

Asservissement. — D'une manière générale, cette expression désigne l'ensemble des organes ou des conditions qui ont pour effet d'éviter les oscillations d'un régulateur.

Ici, l'asservissement résulte de la proportionnalité de la vitesse à la perturbation, et du freinage dont nous venons de parler.

Insensibilité. — Elle est de plus ou moins 4 pour 100.

Amortissement. — Il a pour utilité d'éviter que le régulateur ne fonctionne pour des pointes extrêmement courtes. — L'amortissement résulte ici de la self des inducteurs de G et de l'inertie de l'induit de Mt.

Organes accessoires. — L'excitatrice E est naturellement munie d'un rhéostat d'excitation r qui permet, notamment, d'adapter la régula-

tion à toute composition de ferrailles (tournures, grosses chutes, etc.), en faisant varier le facteur de proportionnalité de la vitesse de Mt à la perturbation à corriger. (Ce facteur doit être d'autant plus petit que les morceaux de la charge sont plus gros).

D'autre part, le shunt réglable s permet d'ajuster le point d'équilibre.

Enfin un contrôleur spécial permet de passer de la marche automatique à la manœuvre à main.

COMPARAISON DES RÉGULATEURS A PISTON HYDRAULIQUE ET DES RÉGULATEURS A MOTEURS ÉLECTRIQUES

Ainsi qu'on va le voir immédiatement, nous ferons ici une comparaison *générale* et nullement relative à tels ou tels appareils déterminés.

Les régulateurs à moteurs électriques peuvent présenter les inconvénients que voici :

- a) Dans la plupart des systèmes, la commande des moteurs s'effectue par des contacts qui sont alors soumis à une forte usure.
- b) Les moteurs travaillent fréquemment dans des conditions assez peu favorables à leur conservation.
- c) La sécurité du fonctionnement laisse quelque peu à désirer.
- d) La régulation est, le plus souvent, tardive.
- e) Les oscillations sont fréquentes.

Mais il importe de bien remarquer que la plupart de ces inconvénients, sinon tous, peuvent être abolis par des dispositions judicieuses. Ainsi, pour ne considérer que le premier, il disparaît complètement dans les régulateurs Sécomet-Vastel ou G.E.C°, pour l'excellente raison que les contacts y sont supprimés grâce à l'emploi des redresseurs à gaz.

Les régulateurs hydrauliques ne sont d'ailleurs pas toujours exempts de tous les inconvénients précités et notamment des oscillations.

Pour conclure, nous dirons que les régulateurs hydrauliques sont probablement supérieurs, *en principe*, mais qu'à côté de la règle générale, il faut considérer les cas particuliers qui résultent de la plus ou moins judicieuse conception des appareils et que, par exemple, le système Sécomet-Vastel pourrait bien être le meilleur, en raison de la qualité remarquable de sa construction et surtout de l'heureux choix de son équation de régulation.

VII. — L'emploi en aciérie, du four à induction sans fer

Cet appareil a la réputation d'avoir un prix prohibitif, et il est vrai qu'il est très coûteux. Il y a pourtant des cas où son emploi est recommandable. Nous allons en donner deux exemples, très différents l'un de l'autre.

PREMIER EXEMPLE

Imaginons qu'il s'agisse de préparer un acier spécial dont la fusion doive avoir lieu soit dans le vide, soit en l'absence rigoureuse de carbone. Les fours à induction basse fréquence et les fours à résistance auxiliaire se prêteraient aisément au chauffage dans le vide, mais les températures maxima qu'ils permettent d'obtenir seraient, en général, insuffisantes ⁽¹⁾. Les fours à arc permettraient d'atteindre la température voulue, mais ils ne se prêteraient pas au chauffage dans le vide et ne réaliseraient pas mieux l'absence de carbone. Le four à haute fréquence ⁽²⁾ est donc ici le seul qui soit apte à rendre le service demandé.

SECOND EXEMPLE

Les aciéries utilisent, dans certains cas, le creuset à flammes comme moyen de fusion. Or, ce procédé implique de multiples inconvénients, notamment de grandes dépenses de creusets, de main-d'œuvre et de coke.

Dans un four haute fréquence dont la charge doit atteindre ou dépasser 100 kg, le creuset amovible des petits appareils est presque toujours remplacé par un garnissage damé sur place. Ce garnissage s'use évidemment assez vite par l'effet du brassage électromagnétique du bain, mais il dure pourtant bien plus longtemps qu'un creuset à flammes, surchauffé de l'extérieur et soumis aux brusques variations de température et aux efforts mécaniques de l'arrachage et de la coulée.

D'autre part, le basculement du four HF permet de n'employer qu'une main-d'œuvre réduite, et celle-ci est moins onéreuse qu'avec

(1) Signalons cependant qu'avec des résistors de graphite, on peut, dans des fours de petite capacité, atteindre des températures voisines de 2.500° (mais avec de sérieux inconvénients).

(2) On sait que cette expression ne doit pas être prise dans son sens littéral. S'il est vrai que, dans le cas de l'alimentation par installation à étincelles, la fréquence soit de l'ordre de 80 000 à 10 000 p : s, elle est ordinairement comprise dans le cas de l'alimentation par alternateur, entre 3 000 et 2 000 p : s (pour les fours d'aciérie). On tend, d'ailleurs, à baisser ces valeurs.

les creusets à flammes, du fait que le travail au four électrique est bien moins pénible et n'exige plus un personnel spécialiste.

Enfin, le rendement calorifique des fours à flammes à creusets est très bas, tandis que le rendement électrothermique des fours électriques est très élevé.

Voici maintenant une comparaison des dépenses d'exploitation. Nous supposons, à titre d'exemple, une production de 2 tonnes d'acier par 8 heures. Les dépenses, ramenées à la tonne d'acier, seront approximativement :

1° Avec un four à flammes, à creusets :

Coke (1.500 kg. à 0 fr. 20)	300 fr.
Creusets (7 creusets de 35 kg. servant chacun pour 4 coulées). ..	245 »
Main d'œuvre ($\frac{1}{2} \times 7$ ouvriers à 34 fr. par jour en moyenne) ..	119 »
Entretien du four	50 »
Total	714 fr.

2° Avec un four H.F. de 250 kg⁽³⁾ :

Energie (750 kWh à 0 fr. 30)	225 fr.
Réfractaire ⁽⁴⁾	20 »
Main d'œuvre ($\frac{1}{2} \times 4$ ouvriers à 32 fr. par jour en moyenne) ..	64 »
Entretien du four	40 »
Total	349 fr.

Par conséquent, si l'on néglige, pour simplifier, l'intérêt des capitaux investis et l'amortissement, l'économie, par tonne d'acier, est de 395 francs, ce qui fait, en marche continue 2.370 francs par jour avec le four précité. On conçoit que dans de telles conditions l'excès du prix de l'appareil sur le prix d'un four à flammes à creusets puisse se trouver remboursé en quelques mois.

Ajoutons que le four à induction sans fer permet d'atteindre aisément de très hautes températures et de réaliser un dégazage parfait du bain, qu'il assure le maintien du métal à bonne température pendant toute la durée de la coulée, qu'il se prête bien à la marche discontinue, qu'il rend facile la récupération des chutes d'aciers spéciaux sans altération des éléments coûteux, et qu'enfin il est peu encombrant, ce qui est dans certains cas une qualité très appréciable.

(3) D'après les données de la Société Générale d'Applications Electrothermiques.

(4) Il semble que cette dépense soit évaluée avec beaucoup d'optimisme. Mais cela ne renverse aucunement la conclusion à laquelle nous arrivons.

VIII. — Conclusion

Nous n'avons pu, en un espace restreint, que donner un simple aperçu de l'état actuel de l'aciérie électrique. Mais nous croyons avoir montré quand même combien est accentuée l'évolution de cette branche de l'électrométallurgie et, notamment, combien sont importants les progrès réalisés dans la construction de certains fours. Peut-être observera-t-on que quelques-uns des perfectionnements signalés à cet égard concernent seulement des accessoires ; à cela, nous répondrons que les principes fondamentaux sont connus depuis longtemps et que la seule difficulté consiste à les appliquer avec fruit. L'aciériste, au surplus, se soucie bien davantage d'avoir un basculement robuste, de bons économiseurs, un régulateur sûr, un réfractaire qui tienne, que de gagner quelques décimales sur le rendement électrique ou sur le facteur de puissance. Nous n'aurions pas exposé notre sujet sous son jour véritable, si nous n'avions pris soin de placer au premier plan les préoccupations du métallurgiste. C'est seulement dans la mesure où il tient compte des desiderata de celui-ci que l'électricien peut accomplir un travail fécond.

INFORMATIONS

DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ELECTRICIENS

Congrès des Ingénieurs et réunion partielle de la Conférence mondiale de l'énergie à Tokio octobre-novembre 1929 ⁽¹⁾

Dans sa séance du 13 mars 1929, le Bureau de la Société française des Electriciens avait désigné parmi les délégués de la Société à ces deux réunions, M. André PERNOD, qui a bien voulu nous envoyer le compte rendu ci-après.

Le Congrès Mondial des Ingénieurs (World Engineering Congress) s'est tenu à Tokio (Japon) du 29 octobre au 7 novembre 1929.

Le Congrès était placé sous le patronage de Son Altesse Impériale le Prince CHICHIBU, frère de l'empereur, et du gouvernement et de toutes les sociétés scientifiques et associations d'ingénieurs du Japon.

C'est la première fois qu'avait lieu une manifestation de ce genre, groupant des ingénieurs du monde entier, en vue de permettre l'échange entre les nations des dernières connaissances scientifiques et données pratiques relatives à l'art de l'ingénieur.

La coïncidence de ce congrès avec une session locale de la Conférence Mondiale de l'Energie qui s'est tenue en même temps à Tokio, avait attiré un très grand nombre de congressistes venus de tous les points du monde et qui ont fait à l'ensemble des deux événements un très gros succès.

Le nombre des ingénieurs inscrits au congrès s'est en effet élevé à plus de trois mille sur lesquels six cents étaient étrangers au Japon, délégués par trente nations.

Notre pays était représenté par une délégation de huit membres, placés sous la présidence de M. BES DE BERC, inspecteur général des mines, représentant le Ministre des Travaux publics. Un envoyé du Ministère de la Marine, Augustin NORMAND, délégué par la chambre syndicale des constructeurs de la marine et moi-même complétions le groupe des congressistes venus de France.

Il est regrettable que le manque de crédits n'aient point permis d'envoyer à Tokio un plus grand nombre de représentants de nos sociétés scientifiques.

Fort heureusement plusieurs personnalités de notre ambassade, deux ingénieurs venus d'Indo-Chine et de Hong-Kong et les directeurs des agences des sociétés privées : l'Air liquide et la Société de Condensation et d'Applications Mécaniques s'étaient joints à nous, ce qui a permis à notre délégation de faire figure honorable à côté du nombre

(1) Voir Bulletin S. E. F., Tome X. 4^e série, avril 1930.

imposant de délégués envoyés par les Etats-Unis, la Grande-Bretagne et l'Allemagne.

Je me suis rendu au Japon en passant par les Etats-Unis, répondant ainsi à l'invitation adressée à notre société par les membres de la délégation américaine en la personne de son président, le distingué Docteur A. SPERRY, dont les travaux sur le gyroscope sont universellement connus.

J'ai donc représenté notre Société et notre Pays, étant seul Français voyageant par cette voie, tout au long d'une série de réceptions et de visites organisées au travers de l'Amérique. C'est ainsi que nous avons eu l'honneur d'être reçus à Washington par M. HOOVER, président de la République, et par M. DEBUCHI, Ambassadeur du Japon ; à Chicago, à Los-Angeles, à San-Francisco et à Honolulu par les clubs d'ingénieurs locaux.

J'ai eu ainsi l'occasion d'admirer l'importance et la bonne organisation des associations d'Ingénieurs aux Etats-Unis. De très intéressantes visites avaient été organisées au cours du voyage, notamment à Los-Angeles par l'administration municipale, et à l'Université de Pablo-Alto (Californie) où M. RYAN a bien voulu nous ouvrir son laboratoire d'études sur la très haute tension et renouveler, devant nous, quelques-unes des expériences à deux millions de volts.

Le congrès s'est ouvert le 29 octobre sous la présidence du Prince CHICHIBU et la clôture a eu lieu le 7 novembre.

Pendant les 9 jours de séance 792 rapports ont été lus. Malgré la division du congrès en douze sections :

1. Problèmes généraux concernant l'art de l'Ingénieur.
2. Machines et instruments de précision aéronautique.
3. Architecture.
4. Travaux publics.
5. Chemins de fer et transports.
6. Transmissions électriques.
7. Electricité industrielle. Eclairage électrique.
8. Machines, Réfrigérants, Industrie textile, Automobiles.
9. Construction navale et machines marines.
10. Industrie chimique. Combustibles et combustion.
11. Mines et métallurgie.
12. Organisation scientifique du travail,

et la répartition des rapports entre les sections, il est resté fort peu de temps pour la discussion. Les résolutions qui ont été votées par les

comités de chacune des sections. Leur détail, qui doit être publié sous peu, ne m'est point encore parvenu. La résolution la plus importante, celle du Docteur STAN SPACEK, délégué de la Tchécoslovaquie, proposait la création d'une fédération internationale permanente d'ingénieurs. Le principe a été adopté à l'unanimité, chaque délégué s'engageant à prendre l'avis de la société qu'il représente afin qu'une décision intervienne au deuxième Congrès Mondial des Ingénieurs.

La session locale de la Conférence Mondiale de l'Energie qui s'est tenue du 30 octobre au 7 novembre, réunissait la presque totalité des membres du congrès des Ingénieurs.

La résolution la plus importante dans le domaine électrique fut celle déposée par un délégué des U.R.S.S. et adoptée dans la séance de clôture, sur la nécessité de réunir des statistiques relatives à l'électricité, sa production et son emploi dans les différents pays du monde.

En dehors de ces deux grands congrès une réunion de la Commission Internationale Electrotechnique a eu lieu le 6 novembre sous la présidence de M. LOMBARDI, délégué italien. Invité par le comité japonais j'ai également représenté notre Société à cette réunion dont voici un bref compte rendu :

M. le Docteur SHIBUSAWA, président du comité electrotechnique japonais, présente les travaux effectués par son organisation pour la standardisation des équipements électriques au Japon ; 25 spécifications normalisées ont été publiées par le bureau.

Pendant toute la durée du congrès un très grand nombre de réceptions ont été offertes, par sa Majesté l'Empereur, par de nombreuses personnalités du monde politique et industriel japonais et par les différentes ambassades.

A l'issue du congrès une série de visites avaient été organisées à travers tout le Japon ; visites qui joignaient à l'intérêt industriel un grand attrait touristique et qui nous ont permis de nous convaincre qu'au point de vue de l'art de l'Ingénieur le Japon n'avait plus grand chose à apprendre des nations occidentales.

En terminant, je tiens à attirer l'attention sur la parfaite organisation des congrès et le meilleur accueil que nous ont réservé, non seulement les dirigeants et les membres du comité, mais la nation japonaise toute entière, par l'intermédiaire de ses municipalités.

L'hospitalité japonaise est très large et on nous l'a amplement démontré.

TRAVAUX DES SECTIONS

LES NOUVEAUX DISPOSITIFS DE CHRONOMÉTRAGE ÉLECTRIQUE AU CENTRAL INTÉRURBAIN DE PARIS. ⁽¹⁾

par M. NIMIER

Ingénieur aux Ateliers Brillié frères.

Suivant le programme fixé par la Direction des Services Téléphoniques de Paris, les nouveaux appareils devaient être de construction française et, en vue d'assurer l'unification de l'heure, à commande électrique. Le temps devait être imprimé en chiffres connus, l'heure de commencement de conversation au-dessous de celle de fin, pour permettre la soustraction facile.

La précision dans l'impression du temps devait être aussi grande que possible, la seconde était désirée.

Au point de vue du compteur, la commande devait être également électrique, les opérations de mise en marche, d'arrêt et de retour de l'aiguille à zéro étant effectuées au moyen d'une clef placée sur le Key Board. En outre, pour éviter toute discordance entre les indications des deux types d'appareils, la mise en marche de l'aiguille du compteur ne devait pas s'effectuer au moment de la manœuvre de la clef, mais au moment de l'impression du temps de début de conversation par l'horloge imprimante.

Les appareils adoptés ont été présentés par la Société des Ateliers Brillié Frères (fig. 1).

A cette occasion se posait le problème de la distribution de l'heure par seconde, celle-ci se faisant habituellement par minute ou demi-minute, précision suffisante pour l'usage courant. En raison du grand nombre d'appareils à commander, on a dû faire usage de relais, à raison d'un relais par meuble de 22 positions, soit 11 horloges imprimantes et 132 compteurs.

Le système de distribution adopté est celui par émissions de courant inversées, qui a fait ses preuves en horlogerie électrique et dont les principaux avantages sont bien connus : insensibilité aux contacts re-

(1) Communication faite à la séance du 14 mars de la 5^e Section, sous la Présidence de M. Reynaud-Bonin.

doublés, aux courants induits, et enfin meilleur rendement des réceptrices par l'emploi de mouvements polarisés.

Les relais devant couper et inverser chaque seconde 5 A sous 24 V, il y avait lieu de prévoir un type de contact inaltérable et notre choix s'est porté sur les rupteurs à mercure dont la fabrication a été parfaitement mise au point depuis quelques années. Ces rupteurs se composent d'un tube en verre dur, généralement en pyrex, comportant deux ou plusieurs électrodes soudées dans le verre et formant

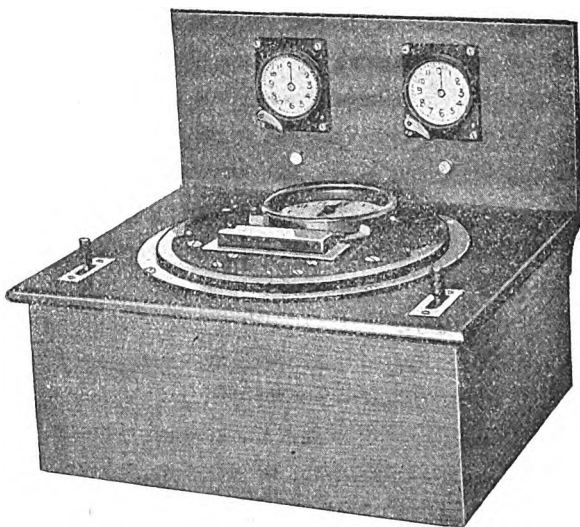


Fig. 1.

autant de petites coupelles qui retiennent quelques gouttes du mercure contenu dans le tube. Ce mercure est distillé dans le vide, après quoi l'on introduit un gaz inerte à pression convenable, généralement de l'hydrogène qui favorise l'extinction de l'arc à la rupture du courant. Suivant l'inclinaison donnée au tube, le mercure réunit ou non les électrodes, ferme ou ouvre le circuit électrique.

L'emploi de ces rupteurs à mercure est tout indiqué dans les appareils d'horlogerie, où l'on ne distingue en général que de faibles forces et de mouvements lents. C'est en effet une particularité intéressante de ces rupteurs qu'à l'inverse des contacts secs pour lesquels on recherche une fermeture et une rupture brusque, le fonctionnement est mieux assuré par un basculement lent du tube. En effet, le mer-

cure pur ne mouillant pas le verre et possédant une tension superficielle assez élevée, la séparation des deux nappes de mercure se fait très brusquement de même que leur réunion, si lent que soit le basculement. Un déplacement brusque au contraire fait clapoter le mercure et donne des contacts irréguliers.

Grâce à cette propriété on a pu réaliser des relais pendulaires qui ont l'avantage d'être simples et très sûrs. Pour obtenir l'inversion du courant, il est nécessaire d'employer deux rupteurs à trois électrodes. Ces rupteurs sont montés sur un balancier synchronisé par un régulateur électrique et participent à son mouvement d'oscillation.

Pour obtenir une durée d'oscillation simple d'une seconde, et l'angle de basculement convenable, au moins 15° , on ne pouvait songer au pendule simple dont la longueur aurait été d'un mètre et la course d'une trentaine de centimètres.

Le problème a été résolu au moyen d'un balancier composé relativement court dont la période est allongée à la valeur convenable grâce à un contrepoids réglable placé au-dessus de la suspension.

En outre du déplacement lent du rupteur, ce relais pendulaire présente l'avantage d'un bon rendement électro-magnétique ; il ne consomme que quelques milliwatts, ce qui réduit beaucoup l'altération des contacts forcément légers du régulateur synchronisant. Même si ces contacts sont incertains ou si certains viennent à manquer, le fonctionnement du relais pendulaire reste assuré en raison de l'énergie accumulée dans le mouvement d'oscillation du pendule. Avec un relais ordinaire au contraire, toutes les défaillances du régulateur principal seraient reproduites sinon exagérées par le relais.

Le courant de distribution à seconde inversé de chaque relais est envoyé dans une ligne qui alimente en permanence les horloges imprimantes d'un groupe. Chacune de ces horloges comprend en principe un mouvement récepteur, un dateur et un dispositif d'impression. Cette impression s'effectue électriquement, ce qui évite tout effort important aux opératrices et débarrasse le Key Board des leviers de manœuvre.

L'opératrice laisse tomber la fiche dans un entonnoir placé en avant du cadran, puis elle pousse l'entonnoir vers la droite au commencement et vers la gauche à la fin de la conversation. Ce déplacement a pour effet de placer l'une au-dessous de l'autre les deux inscriptions, dans la position convenable pour effectuer la soustraction.

C'est l'entonnoir lui-même qui ferme, à fin de course dans chaque sens, le circuit de l'électro-aimant d'impression ; ce dernier attire son armature et lance un marteau contre le dateur, — ou plus exactement contre la fiche qui se trouve entre lui et le dateur, avec interposition d'un ruban encreur. L'inscription est ainsi prise au vol sur le dateur, il faut éviter en effet de presser constamment sur le dateur dont la molette des secondes se déplace à chaque instant. Cette pression empêcherait en outre de retirer la fiche et de ramener l'entonnoir dans la position médiane. L'inscription comprend le quantième et le mois, l'heure, la minute et la seconde ; en raison du mouvement continu de la molette des secondes qui change de position à chaque instant, il faut inscrire deux chiffres des secondes pour être sûr d'en lire au moins un. A cet effet, le marteau est élargi en face de la molette des secondes.

Le mouvement récepteur est semblable à ceux des réceptrices horaires système Brillié. Il se compose en principe d'une bobine à noyau de fer mobile dans le champ d'un aimant permanent. Le circuit magnétique est tel que le flux de l'aimant s'inverse dans la bobine pour un faible déplacement angulaire ; il en résulte un bon rendement électro-magnétique. Le mouvement d'oscillation de la bobine est transformé en un mouvement de rotation discontinu par l'intermédiaire de deux cliquets et d'un rochet de 30 dents. C'est l'arbre du rochet qui fait un tour par minute et entraîne la première molette du dateur, celle des secondes. Celle-ci fait tourner brusquement chaque minute ronde la molette suivante qui a son tour commande celle des heures. Les deux molettes suivantes, quantième et mois ne sont pas commandées automatiquement, ayant été ajoutées après coup à la demande de l'Administration. On doit les changer au moyen d'une clef qui permet également la remise à l'heure éventuelle des autres molettes du dateur.

L'arbre du dateur commande encore les aiguilles d'un cadran visible à la partie supérieure de l'appareil, ce cadran est à notation 12 heures, tandis que la molette des heures est à notation 24 heures pour éviter toute ambiguïté.

L'horloge est enfermée dans un capot fixé dans le Key Board, elle se retire aisément. Les connexions électriques s'établissant par des broches et des balais frotteurs. De même le démontage s'effectue sans toucher aux connexions intérieures. Ce démontage est utilisé pour net-

toyer les molettes et changer le ruban encreur. Ce dernier s'use régulièrement, s'enroulant et se déroulant automatiquement sur chaque rouleau. Ce résultat est obtenu très simplement par le jeu de deux cliquets qu'entraînent l'entonnoir par l'intermédiaire d'un sautoir. Quand une bobine est complètement vide, l'extrémité du ruban qui y est fixée s'oppose au bobinage sur l'autre bobine qui ne pouvant tourner réagit sur le cliquet qui cherche à l'entraîner et fait sauter le sautoir. C'est alors le second cliquet qui entre en jeu et qui attaque la bobine vide pendant que la bobine pleine se déroule.

L'horloge imprimante est combinée, avec un certain nombre de compteurs, placés devant les deux opératrices de droite et de gauche, à raison d'un par circuit.

Chaque compteur est commandé électriquement par une clef placée sur le Key Board. Cette clef peut prendre trois positions, dont deux stables, celle d'avant qui correspond à la marche du compteur et la position milieu qui est celle de l'arrêt ; enfin une position instable, vers l'arrière, qui est celle du retour à zéro de l'aiguille du compteur. Le compteur est encastré dans le meuble et porte à sa face avant un cadran divisé en 12 minutes et subdivisé en 15 secondes. Une aiguille est normalement au zéro, ou plus exactement placée sur le zéro au moment de la mise en marche.

Au début d'une conversation, un peu avant de placer la fiche dans l'horloge imprimante, la téléphoniste fait basculer la clef vers l'avant qui est, comme nous l'avons vu, la position de mise en marche, mais celle-ci ne doit pas se produire immédiatement, mais seulement à l'instant où l'heure est inscrite sur la fiche. Dans ce but, la clef commande dans cette position deux contacts. Le premier ferme sur la ligne de distribution d'heure à seconde le circuit d'un petit électro-aimant dont l'armature fait avancer un rochet.

Le second prépare le circuit d'un deuxième électro-aimant, mais ne le ferme pas directement. Ce circuit n'est définitivement fermé qu'au moment de l'impression du début de la conversation. A cet effet, quand on pousse l'entonnoir de l'horloge imprimante vers la droite, outre le contact d'impression, on ferme un second contact qui permet d'exciter l'électro-aimant dont le circuit a été préparé par la clef. Cet électro reste excité par un bobinage de maintien et un contact monté sur l'armature. C'est ce deuxième électro qui vient embrayer l'aiguille, ou plutôt la roue qui est montée sur son axe, avec un pi-

gnon solidaire du rochet dont il a été parlé tout à l'heure et qui est en mouvement depuis que la clef a été basculée. Le compteur est alors en marche. La roue montée sur l'axe de l'aiguille porte 4 broches en croix qui viennent à tour de rôle fermer un contact électrique pendant 10 à 12 secondes avant la fin de chaque période de trois minutes. Ce contact a un double but : il ferme le circuit d'une petite lampe placée en dessous du compteur pour prévenir l'opératrice qui doit normalement se porter en écoute, enfin il ferme éventuellement le circuit d'un signal phonique qui doit prévenir les correspondants qu'une nouvelle unité va être comptée.

A la fin de la conversation, en même temps qu'elle imprime l'heure sur la fiche, l'opératrice doit ramener la clef dans la position milieu, ce qui a pour effet d'arrêter le compteur en coupant le circuit du premier électro ; le second restant excité par son bobinage de maintien, l'aiguille reste embrayée avec le rochet mais reste immobile comme lui.

Ce n'est qu'après avoir noté sur le compteur le nombre d'unités de conversation que l'opératrice pousse momentanément la clef vers l'arrière et par cette manœuvre coupe le circuit de maintien du second électro-aimant qui se désexcite et libère son armature. L'aiguille se trouvant débrayée est rappelée par un ressort et revient au zéro ; le compteur est alors prêt pour un nouveau fonctionnement. Un petit levier visible au-dessous du cadran permet éventuellement une commande manuelle du compteur.

NOTE SUR L'INTERCONNEXION DES STATIONS CENTRALES DES USINES MÉTALLURGIQUES DU BASSIN DE BRIEY PAR LE RÉSEAU DE LA SOCIÉTÉ ÉLECTRIQUE DE LA SIDÉRURGIE LORRAINE ⁽¹⁾

par M. L. SEKUTOWICZ

La Société Electrique de la Sidérurgie Lorraine s'est constituée au lendemain de la guerre en vue d'apporter tout d'abord un secours d'urgence aux usines et aux mines sinistrées et d'aménager un réseau de transport permettant la marche en parallèle des centrales métallurgiques.

Par cette mise en commun permanente des moyens de production, on a pu assurer la régularité et la sécurité de l'alimentation des mines et des usines en énergie, cette énergie étant obtenue au moyen des excédents de gaz des hauts-fourneaux qui étaient gaspillés antérieurement faute de débouchés suffisants.

Consistance des usines reliées

Sur les 20 usines situées en territoire français et comptant 100 hauts-fourneaux pouvant produire 7 millions de tonnes de fonte par an, la Société a relié à ce jour 10 usines renfermant 60 hauts-fourneaux.

Si toutes les usines de la région étaient raccordées au réseau et ne possédaient pas d'aciéries on pourrait théoriquement disposer de 300 000 à 400 000 kW de puissance moyenne continue permettant de produire 1,5 à 2 milliards de kWh par an. Le débit serait sensiblement constant dans l'année, mais varierait du simple au double dans le courant d'une même journée.

Jusqu'à ces derniers temps la Société n'avait pu relier encore que 10 usines. Elle a obtenu à cet effet une concession de transport, et deux concessions de distribution. La distance des usines les plus éloi-

(1) Communication présentée à la séance du 7 février 1930 de la 1^{re} Section, sous la Présidence de M. Darrieus.

gnées ne dépasse pas 60 km.; le réseau qui les relie est à la tension de 65 000 V et comprend une grande boucle complétée par une liaison diamétrale dont les extrémités aboutissent, d'une part au poste d'Etat de Landres, d'autre part au poste central de la Société à Fontoy. Un réseau à 30 000 V relie les mines et les usines moins importantes.

La puissance totale des 10 centrales reliées est actuellement de l'ordre de 125 000 kW obtenus par 5 moteurs à gaz à 4 cylindres (22 000 kW), 20 à 2 cylindres (50 000 kW), 15 turbines à vapeur (45 000 kW). En outre six groupes convertisseurs relient des usines équipées à courant continu et dont la puissance atteint 30 000 kW, celle des groupes convertisseurs étant de 9 200 kW. La puissance totale des 40 unités diverses ainsi réparties comprend 56 pour 100 correspondant à des moteurs à gaz, 36 pour 100 à des turbines à vapeur, 8 pour 100 à des convertisseurs. Les moteurs à gaz sont à 4 temps et 94 tours, exceptionnellement 107 tours; ils sont de construction assez variée. Le balayage tend à se généraliser. L'allumage se fait par rupteur au moyen d'une source de courant continu auxiliaire, le régulateur agit suivant le système sur la composition du mélange ou généralement sur la durée d'admission. L'instant de l'allumage est réglable.

Parmi les turbines à vapeur, 3 unités alimentées à 30 kg et 400° de surchauffe sont déjà en service.

Bases techniques du système

Lorsque l'Omnium Lyonnais fut chargé, en 1919, de préciser et de réaliser le programme élaboré par les premiers promoteurs de la Société, on constata immédiatement l'importance des difficultés d'exécution à prévoir. D'une part, il était difficile d'évaluer les excédents d'énergie disponibles et, par suite, d'établir un programme financier; d'autre part, la réalisation technique du projet soulevait des objections qui ne sont pas encore levées actuellement pour tous les esprits. Les difficultés sont de deux sortes.

En premier lieu, les excédents d'énergie disponibles varient dans une forte mesure suivant les différentes heures de la journée à cause de l'importance de la consommation des services de l'aciérie et des laminoirs dans les usines complètes qui en sont munies. La puissance disponible aux bornes des centrales de cette catégorie d'usines varie pendant une heure d'une manière analogue à celle d'un réseau de traction en raison de l'importance des pointes des laminoirs, pointes qui

peuvent atteindre plusieurs milliers de kW. et elle varie dans la journée par suite de l'arrêt des laminoirs pendant 8 ou 16 h. par jour.

En second lieu, la nature même du fonctionnement des moteurs à gaz crée des difficultés particulières par suite de la variabilité du couple moteur et surtout des irrégularités de fonctionnement dues par exemple à un allumage anticipé, à des ratés d'allumage, etc...

L'examen des courbes de tension et de fréquence d'une centrale métallurgique appartenant à une usine munie d'une aciérie et de laminoirs est au premier abord peu encourageant, la fréquence variant, par exemple, de 49 à 52 p/s et la tension pouvant varier de ± 4 pour 100 et même davantage. Mais ce médiocre fonctionnement des usines isolées, dont la puissance installée est en général de l'ordre de 15 000 à 20 000 kW, accretue justement l'intérêt de la marche en parallèle, car les à-coups de tension et de fréquence sont immédiatement régularisés et il en résulte déjà, par suite d'un fonctionnement plus régulier des moteurs des services accessoires de l'usine, une augmentation intéressante de la production d'acier laminé.

La marche par à-coups d'une usine isolée provoque d'importantes pertes de gaz, car il n'existe jusqu'ici aucun moyen pratique d'accumuler le gaz ou l'énergie. Seule l'élasticité de marche des appareils Cowper, qui ne peut d'ailleurs être utilisée sans nuire au rendement moyen de ces appareils, régularise dans une certaine mesure le flux de gaz disponible dans l'usine. La possibilité d'écouler à tout instant les excédents d'énergie, bien que ces excédents varient constamment d'une heure à l'autre et même au cours d'une heure, a permis par contre d'obtenir des Cowpers une marche beaucoup plus voisine de celle qui correspond au rendement maximum et il en est résulté une augmentation importante des disponibilités totales d'énergie au cours d'une journée.

En résumé, la marche en parallèle permet la mise en valeur, même pendant les postes de travail des aciéries, d'excédents de gaz qui étaient perdus antérieurement. Elle permet également d'utiliser pendant les postes creux, correspondant à l'arrêt des laminoirs, d'importantes disponibilités d'énergie qui ne trouvaient sans cela aucun débouché.

Enfin, la marche en parallèle de nombreuses centrales procure tous les avantages bien connus concernant la réduction de la puissance nécessaire à maintenir en réserve, et la possibilité de jouer à volonté de la totalité des groupes générateurs et de ne faire fonctionner à faible

charge que ceux dont la marche reste économique dans ces conditions. Pratiquement, on attribuera aux moteurs à gaz le rôle d'assurer la base du diagramme en fonctionnant à charge aussi constante et aussi voisine que possible de leur puissance maximum, les à-coups étant supportés par les turbines à vapeur.

On pensait que l'on serait conduit à créer une centrale thermique de secours à turbines ou même à utiliser une centrale hydroélectrique à réservoir d'accumulation qui permettrait la régularisation de la puissance disponible pour la vente au cours d'une journée. L'utilisation des albraques des mines ne fournit, en effet, à ce point de vue qu'un palliatif insuffisant vu le volume restreint ainsi utilisable pour l'accumulation de l'eau d'exhaure.

On a pu différer la construction de la centrale à vapeur de réserve vu les liaisons réalisées avec les grands producteurs voisins grâce à quoi l'on a pu attendre jusqu'en 1929 et profiter à ce moment des progrès récents de la technique pour répartir entre différentes usines adhérentes les groupes turbo-alternateurs de réserve. Cette solution a permis, au moyen du chauffage au gaz des chaudières, de profiter de toutes les disponibilités de gaz. En munissant, en outre, un certain nombre de chaudières de foyers chauffés au charbon pulvérisé, on peut obtenir, au prix toutefois d'une faible consommation de combustible solide, une régularisation aussi complète qu'il est nécessaire pour tenir compte de ce qui vient d'être exposé au sujet de la variabilité des disponibilités du groupement et des besoins de la clientèle extérieure ainsi que de leur non concordance dans le temps.

Ces groupes, d'une puissance totale de 74 000 kW sont répartis dans 8 usines et porteront à 200 000 kW la puissance totale des alternateurs des usines collaborant à la marche en parallèle.

*
* *

Ayant ainsi rappelé les conditions générales de fonctionnement du système, M. Sekutowicz indique, d'une manière un peu plus détaillée les dispositifs mis en œuvre pour en assurer la régularité.

La marche en parallèle satisfaisante, même en cas d'à-coups importants, des groupes mûs par moteurs à gaz appartenant à une même usine, était un fait établi. Il devait donc suffire de réaliser entre les usines des liaisons d'une assez faible impédance pour placer les groupes dans des conditions comparables à celles d'une liaison borne à

borne et obtenir de cette manière un fonctionnement aussi satisfaisant que dans le cas d'une usine isolée. En fait, l'impédance kilométrique des lignes à 65 000 V de la Société est pratiquement de l'ordre de 0,42 ohm.

Toutefois, les grandes usines à vapeur des secteurs voisins se trouvent reliées aux centrales métallurgiques par un ensemble de lignes et de postes dont l'impédance totale n'est plus négligeable. En fixant pratiquement la fréquence de l'ensemble, ces grandes centrales obligent les moteurs à gaz à travailler même pendant un tour dans des conditions un peu différentes de ce qu'elles sont dans une usine isolée dont la tension et la fréquence varient assez largement avec la charge.

Résultats obtenus

Le premier essai industriel de marche en parallèle de deux centrales métallurgiques eut lieu en 1925 entre Auboué et Thionville et peu après cet ensemble a été connecté à la centrale de la Houve.

En 1926, l'usine de Micheville s'est annexée à cet ensemble et depuis, le groupe de la S.E.S.L a été relié au réseau de la Cie Lorraine d'Electricité au poste d'Etat de Landres, par l'intermédiaire d'une ligne de 140 km.

Les diagrammes montrent que le fonctionnement en marche normale est entièrement satisfaisant ; mais deux sortes d'incidents se sont cependant produits parfois et ont conduit à adopter un régime provisoire en attendant tout au moins que les centrales à turbines aient pris dans l'ensemble une importance suffisamment prépondérante.

Les inconvénients constatés résultent, d'une part, de ce que les centrales à vapeur des secteurs de distribution reliés au réseau tamponnent, qu'on le veuille ou non, ce dernier. Il peut arriver que l'arrêt brusque d'une unité produise un à-coup obligeant les centrales à vapeur à intervenir subitement ou au contraire à réduire subitement leur fourniture, ce qui peut entraîner parfois un fonctionnement intempestif des soupapes de sûreté des chaudières. Cet inconvénient ira en diminuant et sera considérablement réduit par l'adjonction de nouveaux groupes à vapeur dans les usines métallurgiques, surtout si l'on peut arriver à modifier systématiquement la sensibilité du réglage des groupes à vapeur, de manière que ceux appartenant aux centrales métallurgiques réagissent plus vigoureusement aux variations de charge que ceux des secteurs voisins.

En second lieu on a constaté des à-coups de courte durée d'un caractère périodique et donnant lieu à des battements pouvant influencer momentanément l'état des groupes et exceptionnellement produire le décrochage du groupe à gaz fautif.

Cette sorte d'incidents disparaîtrait si tous les groupes étaient constamment en parfait état ou se trouvaient mis automatiquement hors service dès que leur marche devient irrégulière ; c'est ce à quoi on travaille actuellement et déjà la marche en parallèle a rendu aux usines le service d'appeler l'attention sur ces irrégularités qu'une surveillance attentive ne devrait pas laisser passer.

*Etude expérimentale des anomalies de fonctionnement
des groupes à gaz.*

Les battements de puissance ont été étudiés d'une manière assez approfondie, quoique encore seulement qualitative, par l'un de nos collaborateurs, M. Fournier, qui a été conduit à attribuer les battements à l'apparition accidentelle de perturbations rythmées et d'un caractère périodique intervenant avec une fréquence de l'ordre de la fréquence propre d'oscillation du groupe.

La fréquence propre d'oscillation n'est pas immuable, parce qu'elle est fonction de facteurs constants pour une machine donnée et d'un facteur variable dépendant de l'impédance des liaisons électriques du groupe au réseau.

En marche normale, les variations rythmées du couple moteur d'un moteur à gaz à 94 tours et comprenant 2 ou 4 cylindres à 4 temps, provoquent un échange rythmé de puissance entre le moteur et le réseau, échange dont l'ampleur est suffisamment restreinte pour ne donner lieu à aucun inconvénient pratique.

Par contre, un incident de marche tel qu'un allumage prématuré du gaz dans un cylindre, un raté d'allumage ou même un déséquilibre important de l'allure des diagrammes sur les deux faces d'un piston provoque une perturbation rythmée à la fréquence de deux par tour soit en général de 47 par minute et d'une amplitude beaucoup plus considérable. Dans certaines conditions de liaison électrique entre le groupe et le réseau, la fréquence propre d'oscillation du groupe peut se rapprocher suffisamment de cette fréquence pour créer le danger de résonnance et une exagération des battements pouvant

aller, théoriquement, jusqu'au décrochage du groupe et, en tout cas, faire varier l'éclat des lampes d'une manière inacceptable.

Pour éclaircir ces phénomènes, M. Fournier a institué des essais dont le principe peut être intéressant à connaître.

Les appareils de mesure ordinaires étant incapables d'enregistrer l'allure de phénomènes variant avec une fréquence de l'ordre de 47

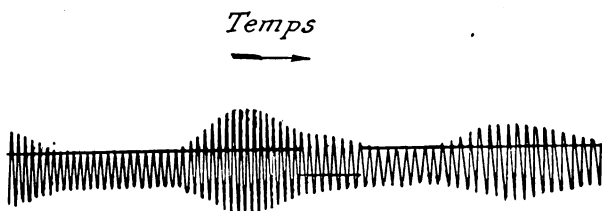


FIG. 1. — Marche correcte sur réseau puissant. Fréquence 94 : mn.
Inscription de l'allumage durée du fonctionnement 2 périodes.
Précision 1/500 de seconde.

à la minute, on a décidé d'utiliser des relevés oscillographiques. On s'est efforcé de faire travailler l'alternateur étudié avec un $\cos. \varphi$ voisin de l'unité et l'on a enregistré ainsi directement, mais d'une manière approximative, au moyen d'un relais ampèremétrique la puissance wattée fournie ou absorbée par le groupe ⁽¹⁾. Dans ces conditions, la courbe enveloppe de la sinusoïde ainsi tracée est elle-même



FIG. 2. — Apparition de la fréquence 47 par minute,
un des allumages étant coupé.

une courbe sinusoïdale qui représente, à un facteur constant près et au moins qualitativement, la puissance électrique fournie ou reçue par l'alternateur à chaque instant.

Le diagramme fig. 1 montre les variations régulières de cette puissance dans un groupe en fonctionnement normal.

La courbe fig. 2 montre au contraire l'apparition des battements de puissance, à la fréquence de 47 à la minute.

(1) Un relais wattmétrique donnerait une indication mieux définie mais dans ces premiers essais on a dû se borner aux moyens les plus simples.

Vu l'importance que présente la régularité de l'allumage, on a enregistré avec le même oscillographe, au moyen d'un équipage distinct, le fonctionnement du rupteur qui produit l'étincelle d'allumage. A cet effet, le courant continu qui traverse le rupteur agit sur un équipage mobile comme il est représenté fig. 1 où le décrochement de la ligne droite ainsi tracée indique avec la plus grande précision l'instant où jaillit l'étincelle.

La vérification de l'allure du diagramme des différents cylindres au moyen d'un indicateur de Watt aurait présenté des difficultés pratiques et en même temps il eut été impossible de situer exactement ces diagrammes par rapport à la courbe sinusoïdale de puissance tracée par l'oscillographe. Pour y remédier, on a eu recours à l'enregistrement de la pression dans le cylindre (fig. 3) au moyen d'un microphone traversé par un faible courant continu agissant sur un troisième équi-

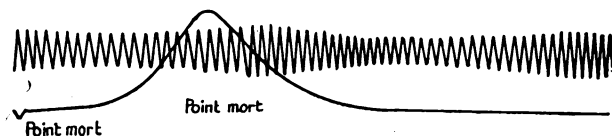


FIG. 3. — Enregistrement de la pression (piezo-microphone) sur un des cylindres (moteur double tandem 8 cylindres. Il y a une explosion toutes les 8 périodes).

page mobile de l'oscillographe. Le cylindre étudié était relié au moyen d'un tube flexible à une capacité métallique (fig. 4) dont une paroi, formant membrane élastique, portait une saillie faisant pression sur le microphone.

Il n'a pas été possible faute de temps et de moyens de tarer l'instrument, mais les courbes se sont inscrites avec une grande régularité et leur allure a permis de déceler certaines anomalies dans le réglage des moteurs à gaz étudiés.

La fig. 2 montre l'apparition de la fréquence 47 provoquée expérimentalement par suite de la suppression volontaire de l'allumage sur une face d'un des pistons.

La fig. 5 montre les battements s'exagérant jusqu'à obliger l'alternateur à fonctionner par instant en moteur, ce qui est le cas entre les points A et B et C et D du diagramme.

On compte poursuivre ces essais et il serait facile de leur donner une précision permettant des mesures quantitatives et aussi de com-

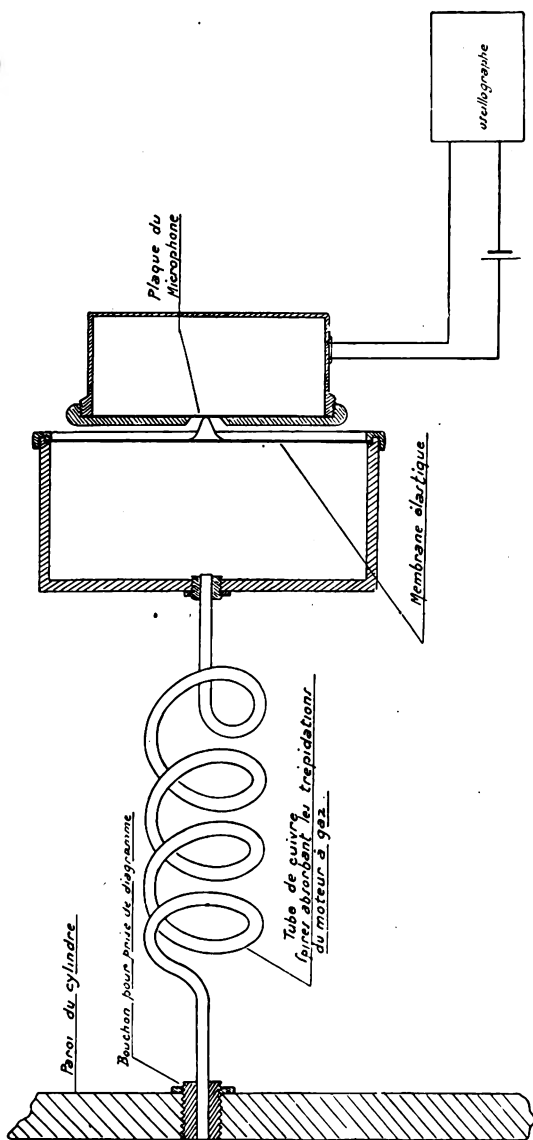


Fig. 4. — Dispositif d'enregistrement de la pression dans un cylindre de moteur à gaz par microphone et oscillographe.

pléter l'étude du fonctionnement des moteurs par l'enregistrement de l'accélération angulaire des groupes.

*Mesures prises pour assurer un fonctionnement satisfaisant
de l'ensemble*

Il n'y a pas lieu d'exagérer les conséquences pratiques des perturbations signalées ci-dessus, car elles n'ont pas empêché le fonctionnement industriel du système. Néanmoins, pour couper court à toute difficulté, la Société a provisoirement profité de l'existence sur tout son réseau de lignes à 6 fils pour constituer deux ensembles distincts. Le premier réunit les usines à hauts-fourneaux purs pour alimenter la clientèle extérieure en marchant en parallèle avec les grands sec-

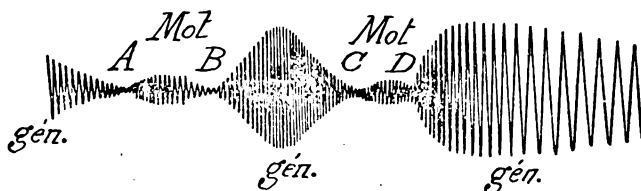


FIG. 5. — Annulation périodique de la puissance par battements

teurs voisins et le second réunit les aciéries. Ce dernier réseau subit seul les variations de tension et de fréquence et, éventuellement, les battements accidentels mentionnés ci-dessus. Toutefois, ces variations sont bien inférieures à ce qu'elles étaient dans chacune des usines avant leur interconnexion. La fixité plus grande de ces deux éléments se traduit par un meilleur rendement de toutes les usines et augmente la production du métal ouvré dans des conditions qui justifieraient presque à elles seules l'intérêt de l'entreprise.

Pour pouvoir faire un pas de plus et réaliser définitivement l'interconnexion absolue de toutes les usines, il conviendra de voir ce que donnera la mise en service des *nouveaux groupes turbo-alternateurs* mentionnés au début.

Ces groupes porteront la puissance des machines reliées à 200 000 kW dont 60 pour 100 en turbines à vapeur.

Leur rôle au point de vue du fonctionnement technique de l'ensemble sera très intéressant, mais il sera encore supérieur au point de vue économique, car on dispose d'un excédent considérable de gaz inutilisé et il est nécessaire, pour trouver des débouchés à l'énergie

correspondante, de pouvoir fournir une puissance de pointe qu'il n'est pas avantageux de demander aux usines étrangères au groupement.

Cette puissance de pointe, pour être indépendante dans une assez large mesure des disponibilités de gaz à l'heure de la pointe, sera obtenue, comme nous l'avons déjà indiqué, par le chauffage mixte au gaz de haut-fourneau et au charbon pulvérisé (et en cas de besoin au gaz de four à coke) de plusieurs des chaudières alimentant les nouveaux groupes.

La mise en service de ces groupes a été précédée d'une étude approfondie. En utilisant des chaudières à haute pression et haute surchauffe (35 kg et 425°) pour obtenir 30 kg et 400° aux turbines, en adoptant, d'autre part, le réchauffage de l'eau par soutirage de vapeur puis par réchauffeur genre Green et enfin le réchauffage de l'air en aval du Green, on a pu, avec une seule turbine par groupe, arriver à des rendements thermiques, inférieurs évidemment à ceux des groupes à gaz, mais permettant d'obtenir un résultat économique supérieur, grâce au faible coût d'installation des groupes turbo-alternateurs et aux moindres frais d'entretien de ces machines.

Le rendement en marche industrielle rapporté aux calories contenues dans les gaz épurés est ici de 18 pour 100 environ contre 21 pour 100 dans le cas des moteurs à gaz ordinaire (ou 26 pour 100 lorsque ces moteurs sont munis de chaudières de récupération). Mais l'inconvénient de ce rendement inférieur est largement compensé par l'avantage économique d'un moindre prix d'établissement, d'autant plus sensible ici qu'il s'agit de machines de pointe fonctionnant à puissance variable, ce qui accentue l'importance des charges financières.

Trois unités sont déjà en service et les autres vont suivre rapidement. Il y aura ainsi au total : 1 groupe de 6 000 kW, 3 groupes de 7 000 kW et 5 groupes de 10 000 kW. Chaque groupe pourra d'ailleurs être doublé par une deuxième unité de puissance au moins égale. Toutes les chaufferies seront munies de dispositifs modernes de contrôle rationnel continu.

Le rôle du répartiteur dans un semblable ensemble est très important. Il doit connaître à tout instant la puissance livrée sur le réseau par chaque usine, la puissance utilisée et la puissance en réserve. A la fin de chaque semaine, on arrête d'avance la liste des machines disponibles pour la marche en parallèle sur le réseau et le diagramme

journalier de la consommation probable de l'usine pendant la semaine suivante.

Le répartiteur, installé à Briey, n'est relié actuellement aux usines que par un réseau téléphonique privé à appel sélectif. Il n'a encore sous les yeux aucun appareil enregistreur et n'est renseigné que par le téléphone et par des tableaux donnant à chaque instant l'image de ce qui se passe sur le réseau, mais manœuvrés à la main par un aide. Ce système devra être complété par une *transmission automatique* des principales indications indispensables au Contrôle.

D'autre part, un service spécial de *contrôle de la production et de l'utilisation* des gaz dans chaque usine va être créé et si possible généralisé et l'on peut en attendre une heureuse influence sur l'économie générale des usines, vu le gaspillage dont nos regrettés collègues, MM. Lavandier et de Loisy, en particulier ont montré, en leur temps, toute l'importance.

Résultats industriels obtenus.

Les indications succinctes qui précèdent, font comprendre les difficultés techniques et commerciales du problème que s'était posé la Société.

Le succès qu'elle a obtenu est mesuré par *l'importance des échanges d'énergie* qui sont passés de 8 millions de kWh en 1923 à 137 millions de kilowattheures en 1929 et qui seront d'environ 200 millions de kilowattheures en 1931. L'énergie mise en valeur est obtenue par des gaz auparavant perdus et représente une recette annuelle de l'ordre de 20 millions de francs. La Société a dû rechercher de nouveaux débouchés, principalement pour l'énergie de nuit. Déjà reliée aux grands réseaux de distribution d'Alsace, de Lorraine et des Vosges, elle vient de participer à la création de deux Sociétés nouvelles qui vont construire des lignes à haute tension en vue de joindre au réseau des usines métallurgiques, d'une part, la région parisienne et, d'autre part, le nord de la France par les Ardennes.

Discussion

La discussion ci-après a suivi la présentation de cette communication à la Séance du 7 février 1930 de la 1^{re} Section.

M. BUNET demande si, du fait de l'accroissement du nombre des turbines par rapport au nombre des moteurs à gaz, on a constaté une augmentation de la consommation de gaz de hauts-fourneaux.

M. SEKUTOWICZ répond que le rendement est de l'ordre de 18 à 19 pour 100 quand on utilise des turbines ; il peut atteindre 26 à 27 pour 100 avec les moteurs à gaz si on utilise en outre des chaudières de récupération.

On a amélioré notablement le fonctionnement des moteurs à gaz grâce à un entretien plus soigné et ces moteurs sont encore perfectibles. Parmi les causes contribuant aux irrégularités de marche signalées, il faut retenir la valeur exagérée du PD^2 de quelques moteurs, mais les incidents provoquant des battements sont dûs, avant tout, aux allumages intempestifs résultant par exemple d'un manque d'étanchéité des segments ou de la présence de résidus incandescents dans le cylindre. Un bon entretien permet d'éviter ces accidents.

M. RIEUNIER demande si, en tenant compte des conditions générales de marche du réseau, la faible puissance unitaire des moteurs à gaz constitue parfois une gêne.

M. SEKUTOWICZ répond que cette gêne ne fait aucun doute. Il est bien évident qu'il vaut mieux avoir affaire à un petit nombre de grosses unités qu'à un plus grand nombre de moteurs de puissance réduite. Quels que soient leurs inconvénients, il faut cependant retenir en faveur des moteurs à gaz leur rendement élevé.

M. DARRIEUS souligne l'importance des résultats obtenus sur l'ensemble du réseau lorrain du fait de l'interconnexion. En envisageant cette question d'un point de vue plus général, on peut dire que, malgré les avantages intrinsèques de l'interconnexion, on se heurte souvent en France dans son application à la mauvaise volonté des exécutants.

Il demande à M. Sekutowicz si sur le réseau en question il a été toujours possible de placer les excédents de nuit.

M. SEKUTOWICZ répond que, jusqu'à maintenant, on n'a rencontré aucune difficulté pour placer la production, y compris les excédents de nuit. D'ailleurs le pompage dans les mines permet d'améliorer la courbe de charge.

Dans l'éventualité d'un accroissement de la production, on songe à des applications locales. Même dans ce dernier cas, l'interconnexion des usines ne perd pas de son intérêt et celle-ci resterait indispensable, en admettant un développement important des industries électrochimiques.

M. DARRIEUS, en constatant que cette communication a fait ressortir une fois de plus l'intérêt que présente l'interconnexion, signale qu'aux Etats-Unis, sur des réseaux interconnectés où 1 000 000 kW étaient en jeu, il a pu se produire des chutes de charge de 40 000 kW sans que la fréquence varie de plus d'un dixième de période par seconde.

M. EHRLMANN, revenant sur la question du rendement des installations alimentées par des moteurs à gaz de hauts-fourneaux, signale qu'on pourrait obtenir un rendement s'élevant jusqu'à 30 ou 35 pour 100 en utilisant l'eau de refroidissement des cylindres de moteurs. On pourrait, en effet, concevoir des centrales mixtes gaz-vapeur utilisant des accumulateurs Rateau, solution qui donnerait plus de souplesse aux moteurs à gaz. Théoriquement, le problème ne présente pas de difficultés, car on dispose d'un écart de température très supérieur à celui qu'ont utilisé MM. Claude et Boucherot dans leurs expériences bien connues. La difficulté la plus sérieuse est d'écarter les risques de rupture de cylindre qui peuvent résulter des inégalités de température dans le métal dues à un apport d'eau froide.

M. DARRIEUS pense que l'idée de M. Ehrman, que défend également M. Guéry, est intéressante. Le problème ainsi posé revient, en définitive, à étudier des cylindres dont l'enveloppe réfrigérante puisse en quelque sorte fonctionner comme chaudière.

LA CHUTE DE TENSION AU CONTACT DES BALAIS SUR LES BAGUES COLLECTRICES ⁽¹⁾

par M. PERRIER

Ing. E.S.E., Chef du Laboratoire de la Société « Le Carbone ».

Dispositif expérimental. — Usure mécanique au début de l'expérience; polissage. — Chute de tension durant la première heure. — Phénomènes électrochimiques; paline. — Répartitions inégales entre balais. — Répartitions inégales entre points d'un balai. — Origine de l'électrolyse. — Autres caractéristiques. — Enseignements pratiques. — Conclusion.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Proposons-nous de relever la caractéristique de chute de tension au contact d'un balai donné, placé sur une bague, en fonction de la densité du courant. La bague bien ronde et bien équilibrée tourne à une vitesse uniforme ; le balai coulisse dans un porte-balai soigneusement réalisé et soumis à une pression uniforme durant tout l'essai. On ne constate aucune vibration. La température du balai maintenue constante est contrôlée au moyen de couples thermoélectriques ; l'ensemble balais et bagues est enfermé dans une boîte close et aucune vapeur étrangère ne vient compliquer l'essai. Enfin, pour l'instant, la densité de courant est maintenue égale à une valeur fixée d'avance.

Pour préciser les variables, nous regarderons ce qui se passe en courant continu sur deux machines voisines ; sur l'une, les balais des deux polarités tracent une même piste, sur l'autre, au contraire, ils sont décalés suivant l'axe. Ces bagues supposées faites de cuivre par exemple, sont reliées à une bague auxiliaire de nickel sur laquelle porte un balai destiné à mesurer la chute de tension pour chaque polarité. Comme ce balai pourrait présenter lui-même une chute au contact, nous réalisons une méthode de zéro selon le schéma ci-contre (fig. 1). Le courant passant dans le sens des flèches, P est le balai positif, c'est-à-dire que le contact est parcouru par le courant dans le sens « balai-bague » ou encore que le balai positif est anode, si bien que s'il y a électrolyse de la couche de vapeur d'eau séparant le balai

(1) Communication présentée aux séances des 7 février et 6 mars 1930 de la 1^{re} Section de la Société Française des Electriciens sous la Présidence de M. Darrieus.

de la bague, l'hydrogène se dépose sur le collecteur, l'oxygène sur le balai. C'est en somme le balai positif d'une réceptrice. Ce balai trace sur la bague la piste que nous appelons piste positive.

N est le balai négatif : il trace la piste négative.

A est le balai auxiliaire, frottant sur une bague en nickel C soudée à la bague en cuivre B ; R_1 et R_2 sont deux boîtes de résistance jumelées ; G est un galvanomètre maintenu au zéro par réglage de R_1 et de R_2 .

Pour roder les balais, nous donnons un coup de pierre ponce de grain et de consistance appropriés à la nature du métal et à la vitesse

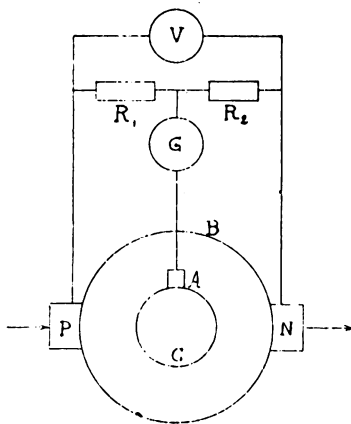


Fig. 1. — Schéma de montage.

périphérique de la bague. Dès qu'un élément de pierre touche celle-ci, nous voyons le voltmètre descendre très sensiblement à zéro.

Lorsque le ponçage est terminé, la tension ne remonte que lentement, au bout d'une heure ou deux ; l'enregistrement laisse croire que la chute de tension a atteint son palier et on pourrait, si on arrêta l'expérience à ce moment, penser avoir obtenu le régime de fonctionnement stable (fig. 2), d'où le procédé indiqué par beaucoup d'auteurs qui admettent une mesure comme possible après un nombre d'heures défini arbitrairement.

USURE MÉCANIQUE AU DÉBUT DE L'EXPÉRIENCE

Durant le ponçage, il est évidemment inutile d'examiner la chute de tension. Il est impossible de dire quelle est la densité de courant

en un point déterminé de la face frottante du balai. Tout ce que nous savons, puisque nous avons un seul balai pour chaque polarité, c'est la densité moyenne sous la face entière du balai, mais nous ignorons comment se répartit le courant.

Peu à peu, les grains de pierre ponce s'éliminent ; la bague tournant, l'usure mécanique fait que le balai épouse progressivement la surface du collecteur. La courbe d'enregistrement tend vers un palier. Allons-nous pouvoir définir la densité de courant ?

Le polissage. — Nous pouvons penser que nous y arriverons en polissant collecteur et balai par l'action d'une toile émeri très fine sui-

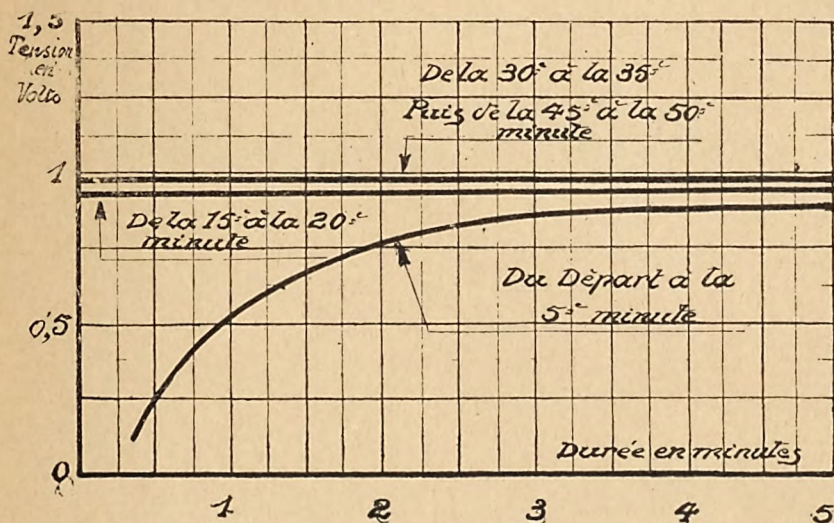


Fig. 2. — Chute de tension au contact durant les premiers instants après le ponçage, en fonction du temps (+ et — en série) (150 g/cm^2 — 10 A/cm^2 — 30 m/s atmosphère sèche — 35°C).

vie d'une rotation prolongée sans courant. Au bout d'une heure, piste et balai ont l'aspect d'un miroir.

Faisons passer le courant, la chute au contact est très élevée ; nous avons facilement obtenu jusqu'à 5 V pour 2 A/cm^2 . Il y a des étincelles filantes, c'est un désastre (fig. 3). Cette action du polissage est un fait peu connu et pourtant elle paraît naturelle si l'on se reporte à la théorie (1). En électrostatique, on consacre quelques lignes au

(1) M. Mauduit « recherches expérimentales et théoriques sur la commutation dans les dynamos à courant continu (Dunot et Pinat 1912) pages 124 et 220. M. Branly (Comptes rendus de l'Ac. des Sciences, tome 134, pages 347 et suivantes).

pouvoir qu'ont les pointes de décharger les corps par effluves. Donner des pointes à un balai c'est, toutes choses égales d'ailleurs, lui permettre d'émettre ou d'absorber plus facilement des électrons. Supprimer les pointes, polir, c'est augmenter la chute de tension au contact.

Cet effet du polissage se rencontre, non seulement en laboratoire, mais aussi dans des cas pratiques ; il est fréquent sur les bagues ainsi que sur les collecteurs et donne lieu au phénomène connu en France sous le nom d'inégales répartitions de courant que les Anglais désignent par « commutation sélective ». Au hasard, les câbles d'un balai

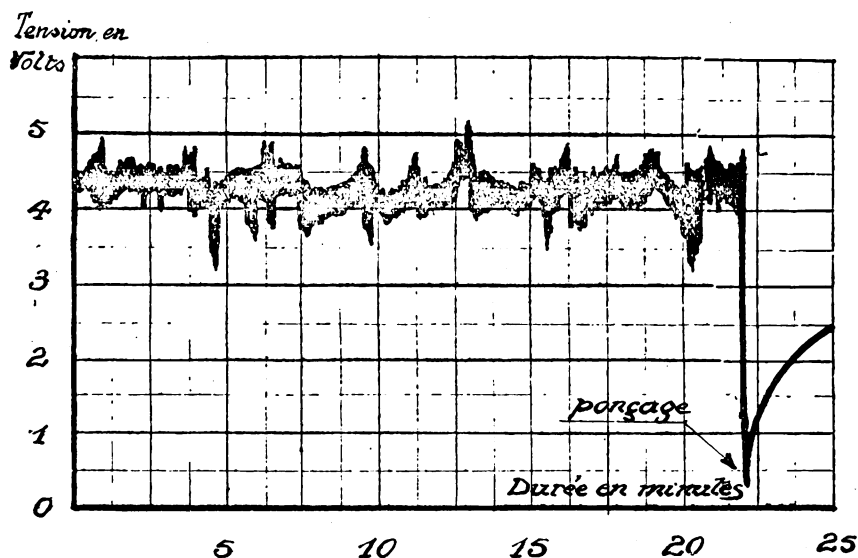


Fig. 3. — Chute de tension au contact, après polissage, en fonction du temps (+ et — en série) (150 g/cm^2 — 2 A/cm^2 — 30 m/s atmosphère sèche — 32° C).

rougissent, puis ceux d'un autre. La plupart du temps, un autre défaut apparaît. Ce sont des vibrations intenses des balais dont nous aurons l'occasion de reparler sans doute ; elles sont signalées souvent par un crissement des balais et elles peuvent devenir d'une importance telle que les balais se rompent ou que les scellements des câbles se détachent. C'est l'accident normal sur les moteurs de locomotives de grande traction remorquées sur une cinquantaine de kilomètres.

CHUTE DE TENSION DURANT LA PREMIÈRE HEURE

Jusqu'ici, nous n'avons pu saisir un instant où pourrait être définie la densité du courant à la face frottante du balai. Nous ne serons pas plus heureux dans les phases suivantes du phénomène.

Revenons à la période du palier apparemment obtenue quelques heures après la mise en route. L'enregistrement donne une belle ligne très droite, très ferme (fig. 4).

Relevons une caractéristique en fonction de la densité du courant. Nous obtenons la courbe de la figure 5 définie sans aucune ambiguïté

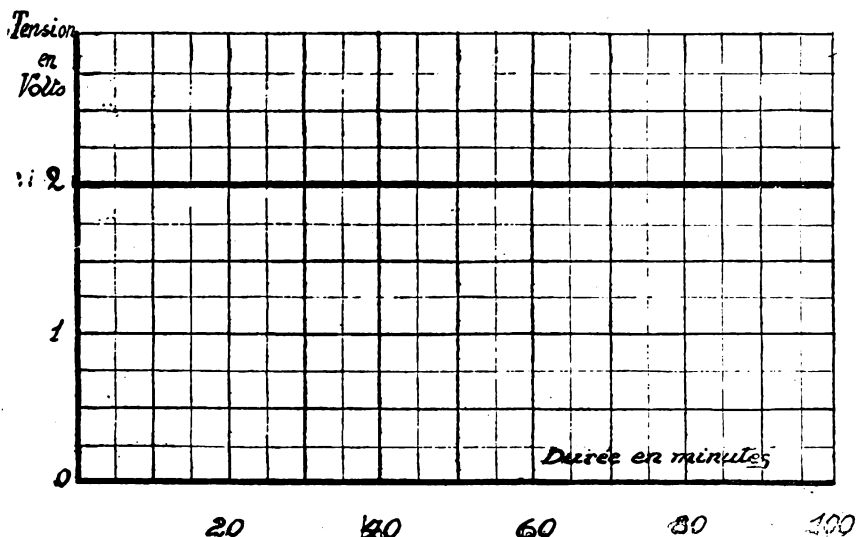


Fig. 4. — Chute de tension au contact, une heure après ponçage, en fonction du temps. (150 g/cm^2 — 10 A/cm^2 — 30 m/s — atmosphère sèche — 35°C).

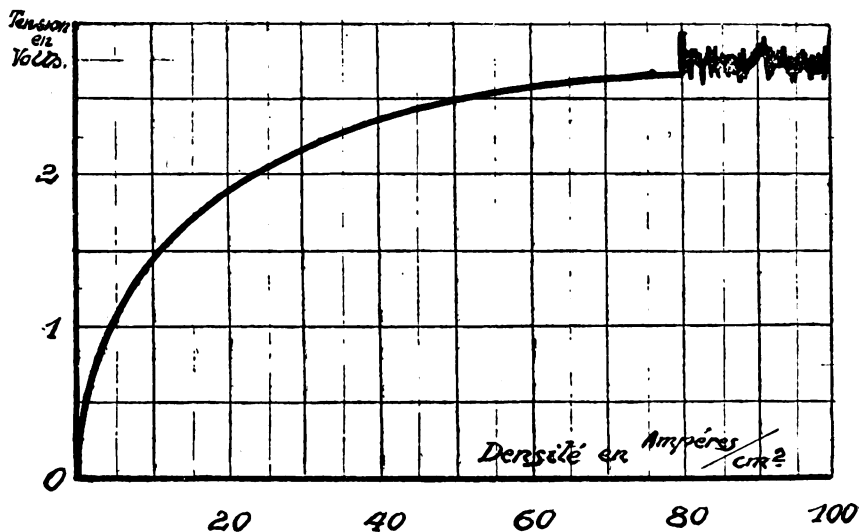


Fig. 5. — Chute de tension au contact, une heure après m/s — densité de courant et température variable). (+ et — en série) (150 g/cm^2 — atmosphère sèche — 30 m/s — densité de courant et température variable).

et que nous pouvons relever avec facilité jusqu'à des régions où la densité moyenne atteint 80-90-100 A/cm². A ce moment, se produit une sorte de décrochage, le voltmètre est instable et oscille fortement on n'aperçoit pourtant pas encore d'étincelles.

Si nous avons relevé en même temps les courbes pour chaque balai, nous remarquons que la chute sous le balai négatif est supérieure d'environ 10 pour 100 à celle du balai positif. La caractéristique relevée présente l'aspect classique. Si l'on veut recommencer l'essai, la difficulté est de se remettre dans des *conditions identiques de densité vraie*

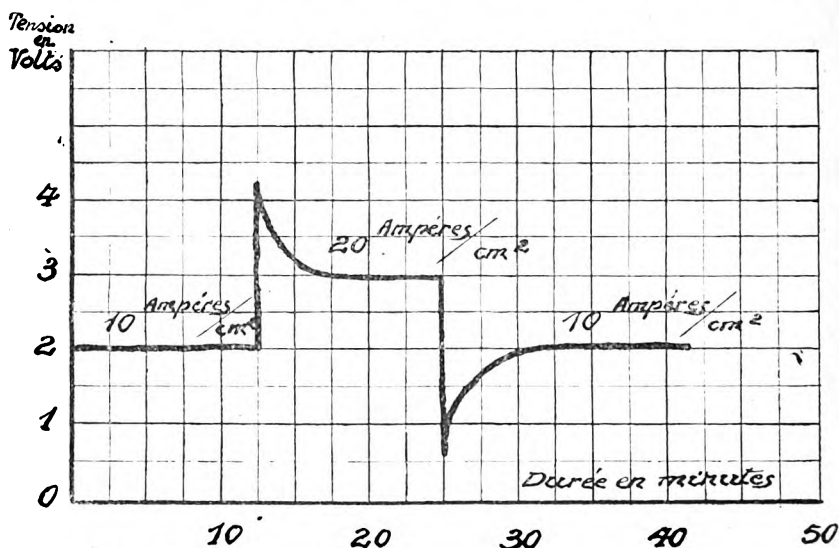


Fig. 6. — Chute de tension au contact pour une variation de la densité du courant en fonction du temps. (150 g/cm² — 10 A/cm² — 30 m/s — atmosphère sèche — 35°C).

de courant, de distance des balais au collecteur, de nature des surfaces en contact, d'atmosphère ambiante. L'expérience montre que, d'un essai à l'autre les valeurs relevées varient considérablement, souvent de plus de 10 pour 100. L'allure même des courbes varie également. Il y a lieu de noter, en passant, que le relevé d'une caractéristique est assez long.

Dans les premiers instants consécutifs à une variation de courant, le contact se comporte à peu près à la manière d'une résistance chimique, la tension au contact étant à peu près proportionnelle à la densité de courant (fig. 6). Il faut 3 ou 4 minutes pour atteindre une valeur sensiblement constante.

PHÉNOMÈNES ÉLECTROCHIMIQUES — LA PATINE

Nous avons ainsi décrit un phénomène dont l'évolution très rapide durant les premières heures de fonctionnement se ralentit quand la durée de l'essai se prolonge. C'est la variation géométrique du contact qui est de beaucoup la plus marquée et qui atteint également les deux balais. Désormais, l'usure mécanique restera très faible, de telle sorte que nous pourrions discerner des facteurs nouveaux, peu faciles à déceler jusque-là : les phénomènes d'ordre chimique et électrochimique.

Nous supposons, dans ce qui va suivre, que le balai employé ne contient pas de métal, mais des variétés de charbon avec très peu d'impuretés.

Au bout de quelques heures de fonctionnement, les pistes des bagues se teintent et, si les balais de polarités différentes ne couvrent pas les mêmes pistes, la négative évolue beaucoup plus rapidement que la positive. Le phénomène est en particulier assez curieux à suivre sur le cuivre. On voit se succéder toute une gamme de couleurs présentant très souvent l'aspect irisé des lames minces. La patine se forme : la chute de tension augmente graduellement. Sur la piste mixte, chutes positive et négative montent sensiblement dans la même proportion. La plupart du temps, les interpistes se teintent aussi, en même temps, mais avec un certain retard dans l'évolution de la coloration.

La rapidité de la formation de la patine est fonction, en même temps que des circonstances atmosphériques, de la température et de densité de courant dans le balai, du nombre de balais placés sur une même piste. On pourrait définir ainsi une densité de courant sur la bague, comme on en a défini une sous le balai ; ce serait un facteur K, ayant la forme suivante :

$$K = \frac{AB}{\pi DN} = \frac{AB}{V}$$

où

A = intensité captée par centimètre de longueur axiale sous un balai,

B = nombre de balais sur une même piste,

D = diamètre de la bague,

V = vitesse périphérique de la bague,

N = nombre de tours par minute.

Les machines présentant un K élevé devraient, toutes choses égales d'ailleurs, être poncées plus fréquemment que les autres.

*

Par suite de la corrélation liant le phénomène à la polarité des balais, nous attribuons à une électrolyse locale la formation sur la piste négative d'une couche isolante d'un sel de cuivre, oxyde, sulfure, ou chlorure en général qui souvent est susceptible d'un poli beaucoup plus parfait que le cuivre. La résistance au contact augmente donc d'une façon continue. Si nous relevons à différentes heures les chutes de tension au contact en fonction de la densité de cou-

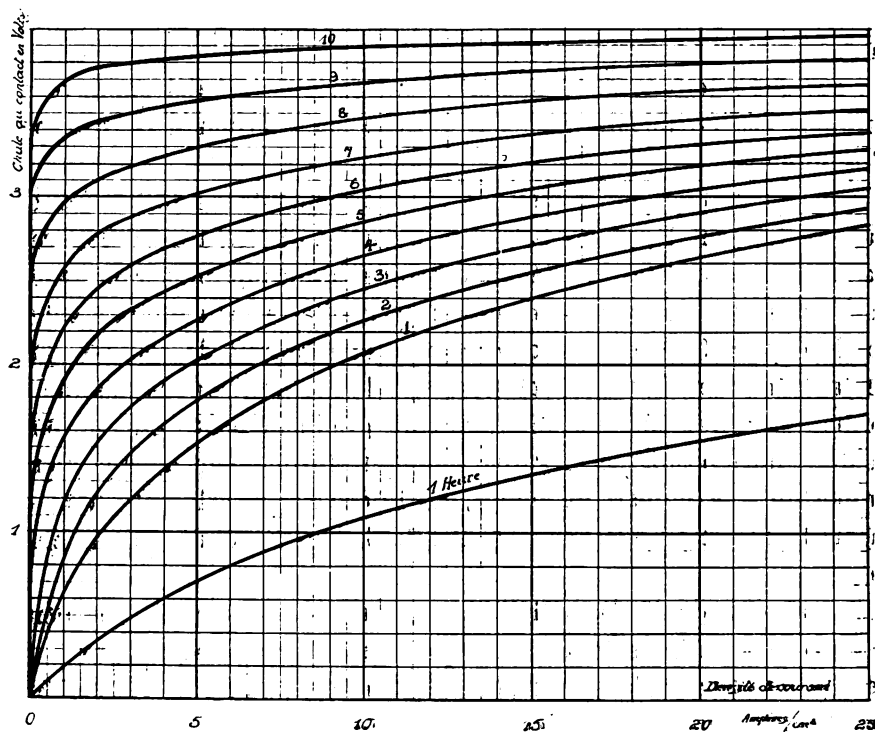


Fig. 7. — Chute de tension au contact de la patine en fonction de la densité de courant pour divers degrés de formation.

rant, nous obtenons une succession de courbes sans cesse plus élevées et sans cesse moins inclinées pour la même densité de courant. En même temps, le point pour lequel l'enregistrement marque le décrochage dont nous avons parlé plus haut, s'abaisse vers la région des faibles densités.

Inégales répartitions entre balais. — Si l'on poursuit l'essai, on s'arrête en général à la courbe marquée 6 sur la figure 7 ; les courbes supérieures ont été obtenues au laboratoire en polissant le balai avec

du charbon de bois. Le décrochage de l'enregistrement, qui se produit toujours vers la même tension, fait que les enregistrements sont tous très hachurés pour les courbes relevées sur vieille patine. Il est facile de se rendre compte, à l'examen des courbes 8, 9 et 10, de la *tendance aux inégales répartitions de courant*. Du fait que les *coefficients angulaires des tangentes aux courbes* deviennent de plus en plus faibles, l'*auto-régulation de la répartition du courant* entre balais différents et entre fractions d'un même balai, devient de plus en plus aléatoire.

Supposons qu'une étincelle jaillisse en un point d'un balai, elle désagrège une certaine zone. Par suite de la chaleur développée en ce point par le passage d'une grande partie du courant, la désagrégation s'étend peu à peu au balai entier et son débit n'est limité que par la part captée par les voisins, part qui peut être très faible, et par les résistances en série avec le contact balai-bague : Résistance propre du balai, résistance de contact balai-câble, résistance du câble, avec lesquelles peuvent jouer en parallèle les résistances du porte-balai (cage, poussoir, ressort).

Inégales répartitions entre points d'un balai. — Dans le cas normal, il arrive un instant où, sous le balai négatif dont la chute de tension est la plus élevée, cette chute atteint la tension disruptive. En un point de ce balai, une étincelle invisible s'amorce et comme ce point est cathode dans l'arc, cette étincelle y reste fixée, le dégradant, lui donnant la structure tourmentée qu'il avait au début. En ce même point, la densité devient assez grande, l'échauffement local est tel que la couche d'oxyde est brisée. Si le balai positif se trouve sur la même piste, à la craquelure de patine ou le cuivre est mis à nu, on voit correspondre dans la face frottante un sillon creusé par le passage du courant et couvrant toute la portée du balai. A ce moment, il faut encore moins parler de densité de courant qu'auparavant.

L'évolution de la patine de la bague continuant, le courant use sur les balais et sur le collecteur les zones où il se concentre ; de nouvelles zones se forment ensuite, qui persisteront plus ou moins selon les circonstances.

Enregistrement. — A ce moment les enregistrements de chute de tension présentent un aspect assez curieux : les courbes tracées présentent une enveloppe très nette vers les hautes chutes avec de fréquentes pointes vers les basses. On répète à volonté ces basses chutes

en déplaçant la bague latéralement de si peu que ce soit, ce qui amène la superposition des zones pleines du balai et de la bague et crée à nouveau l'état rugueux auquel correspondent les basses chutes.

L'aspect des faces frottantes du balai est très caractéristique, surtout avec les balais de plombagine. On discerne aisément le balai négatif, marqué de virgules naissant en différents points, de la face frottante pour mourir à l'arête de sortie du balai positif dont les hachures cou-

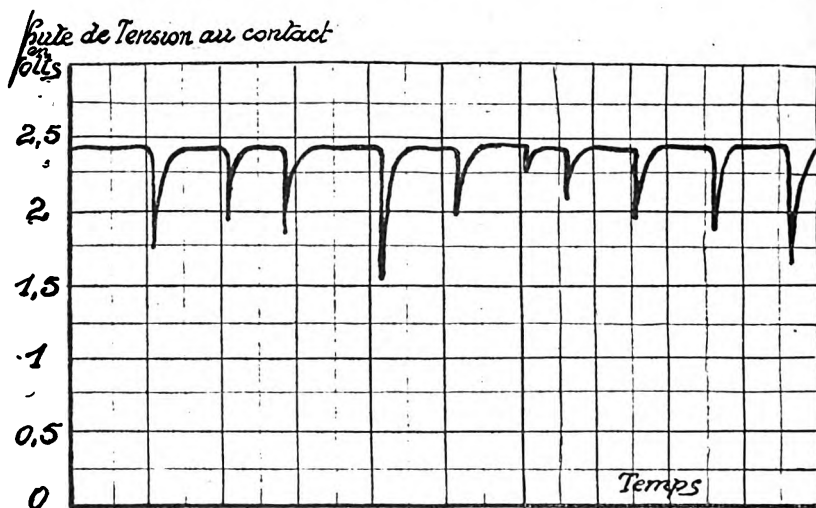


Fig. 8. — Chute de tension au contact, quelques jours après poinçage, en fonction du temps.

vrent toute la portée comme si les balais avaient été modelés sur le collecteur.

Si nous avons employé un balai contenant un pourcentage notable de cuivre, nous verrions le phénomène d'oxydation du balai se superposer à celui de la piste, les chutes sous les deux balais évoluant sensiblement de la même façon.

Origine de l'électrolyse. — Comment se produit l'électrolyse ?

Nous classerons à cet effet les balais en trois catégories :

- balais à base de plombagine naturelle,
- balais constitués par des charbons presque chimiquement purs : noir de fumée, coke de pétrole, coke de cornue, etc...,
- balais métalliques contenant avec de la plombagine, un métal ou un alliage.

La plombagine naturelle qui sert à faire les balais est tirée de mines voisines de gisements métallifères. On élimine par lavage et lévigation le gros des éléments étrangers (oxyde de fer, silice) et on obtient un produit contenant de 3 à 4 pour 100 de cendres, en général assez riches en silice.

Avec des balais en plombagine naturelle, il suffit d'un temps humide pour que commence l'électrolyse qui se produit même en atmosphère pure, l'électrolyte étant ici fourni par le balai. C'est pourquoi ces produits ont été accusés assez souvent d'être abrasifs, ils n'usent pas mécaniquement, comme le fait, la pierre ponce, mais électriquement. Pour s'en convaincre, il suffit de remarquer qu'à vide, il n'y a jamais d'usure et que sur les collecteurs, les sillons profonds correspondent aux seuls balais négatifs d'une réceptrice. Les constructeurs ont pris l'habitude de quinconcer les balais pour répartir uniformément l'usure tout le long du collecteur.

Les balais en carbone artificiel, ne contenant que des produits plus purs, sont beaucoup moins sensibles à l'humidité. Avec ces balais, il y aura néanmoins usure du collecteur si l'atmosphère contient des gaz électrolysables.

Pour ce qui est des charbons métalliques, employés la plupart du temps en courant alternatif, l'électrolyse donne immédiatement des produits pulvérulents extrêmement fins qui proviennent du balai, pendant une demi-période, de la bague pendant l'autre demi-période ; ces poussières peuvent être extrêmement abondantes si, dans le bronze du balai ou dans le métal des bagues, se trouve un élément métal, libre ou en combinaison, très facilement oxydable ; nous avons tout spécialement en vue l'aluminium et le zinc.

Autres caractéristiques. — Nous n'avons pu réussir à définir la caractéristique de chute de tension en fonction de la densité de courant. Comme la géométrie du contact (forme et distance) joue un rôle prépondérant dans sa résistance, nous ne pouvons espérer faire mieux dans l'étude des autres paramètres parce que nous serons obligés de déplacer le balai. Ainsi, si nous faisons varier la pression, l'effet instantané est une diminution de la chute, l'effet lointain, par polissage, pouvant être une augmentation. Une augmentation de température diminue la résistance par effet thermionique, mais l'augmente par suite de l'oxydation. Les résultats relevés dans la pratique courante

dépendent essentiellement du porte-balai et des vibrations de la machine.

ENSEIGNEMENTS PRATIQUES

Quels enseignements pratiques peut-on tirer de cette étude ?

Le fabricant de charbons évite le glaçage des balais en choisissant judicieusement les matières constituanes, les traitements mécanique et thermique de la matière. Il conseille quelquefois, pour les cas difficiles, de rainurer les balais en traçant sous leur face frottante des traits de scie qui multiplient les zones où le polissage n'aura aucune action.

On a préconisé aussi, pour arriver au même résultat, de pratiquer sur les bagues des rainures analogues aux entre-lames des collecteurs à courant continu.

Le constructeur de machines, de son côté, doit éviter de tirer des conclusions hâtives de résultats obtenus en plate-forme durant un nombre d'heures trop limité. Bien souvent, ces essais de plateforme sont précipités et les machines sont livrées sans qu'on ait pu s'assurer de leur fonctionnement en régime prolongé, ce qui entraîne parfois des surprises désagréables chez la clientèle, après quelques jours de marche.

Pour éviter ces ennuis, nous avons indiqué à quelques-uns de nos visiteurs un procédé capable d'accélérer le vieillissement de la patine du collecteur et qui a donné pleine satisfaction dans les quelques cas où il a été appliqué : il consiste à passer sur le collecteur un chiffon légèrement imbibé d'un électrolyte très étendu. Après quelques étincelles, collecteurs ou bagues prennent très rapidement une patine semblable à celle qu'ils acquerraient après plusieurs jours de marche. Ce procédé assez brutal ne peut être appliqué que par des électriciens très experts. Nous mettons au point une composition qui permettra de faire ce travail sans aucun danger.

Enfin, l'exploitant doit tout d'abord protéger la salle des machines contre les vapeurs qui peuvent en vicier l'atmosphère ; c'est une condition nécessaire de bon fonctionnement ; c'est en outre une économie, car l'usure du balai et celle du collecteur sont très faibles en lieu sec et en atmosphère saine.

En deuxième lieu, il convient de surveiller assez fréquemment le collecteur : il ne faut pas perdre de vue que le polissage du balai et

de la bague est un élément de trouble. Au départ, il faudra former les faces frottantes avec une pierre ponce de grain et de compacité appropriés. L'usage de l'émeri doit être évité : en effet, des grains d'émeri peuvent s'insérer dans le balai, ils tracent alors sur le collecteur ou sur la bague un sillon qui, toujours propre, et captant par suite un excès de courant, sera l'amorce d'une usure électrique du collecteur ou de la bague. De plus, l'opérateur qui commence un travail à la toile émeri a tendance, pour mieux finir son travail, à utiliser des numéros de toile de plus en plus fins et à obtenir ainsi des faces frottantes beaucoup trop glacées.

Pour ce qui est du fonctionnement des machines, il faut éviter de laisser tourner longtemps les machines avec de très faibles densités de courant sous les balais (inférieures à 2 A/cm^2) sans quoi le balai se glace ainsi que le collecteur, la chute de contact augmente et il se produit d'inégales répartitions de courant, des étincelles ou des vibrations intolérables. Nous dirons, pour énoncer une idée peut-être nouvelle, que pour obtenir une marche satisfaisante, l'usure électrique doit dépasser l'usure mécanique.

Enfin, si au bout de quelques semaines, la machine commence à présenter une commutation difficile, un coup de ponce léger pour briser la glaçure, suivi d'un nettoyage des gâines porte-balai et d'un réglage des pressions, remettra presque toujours les choses au point.

CONCLUSION

Pour nous résumer, nous sommes à même d'affirmer les propriétés suivantes du contact entre balai et bague :

La chute de contact est d'autant plus faible que la surface du balai est plus rugueuse et que le collecteur est plus propre.

Il apparaît des étincelles, même sans coupure du courant, sous un balai trop poli qui présente alors une haute chute.

L'oxydation, la sulfuration, la chloruration du collecteur sont des facteurs qui, comme l'usure mécanique, augmentent la chute au contact et favorisent la formation des étincelles, l'usure du collecteur et du balai ainsi que les inégales répartitions de courant.

Discussion

Lors de la présentation de ce rapport devant la 1^{re} Section les remarques suivantes ont été faites :

M. PESTARINI a remarqué que des machines, ayant un certain temps de service, commutaient bien tout d'abord, puis crachaient quand la température des balais s'élevait ; il demande à M. Perrier comment, à son avis, on peut expliquer ce phénomène.

M. PERRIER répond qu'on a essayé de séparer dans l'étude de la commutation l'action de la température, de la pression, de la vitesse périphérique, etc... Sur les machines courantes les caractéristiques dépendent plus du porte-balais que du balai ; les isolants placés sous la tige du porte-balai ne se comportent pas comme le métal sous l'effet de la température, il peut donc en résulter un jeu qui empêche les balais de porter convenablement. On peut dire, d'une façon générale, que, dans la commutation, la mécanique intervient dans la proportion de 80 p. 100.

M. GRATZMULLER estime qu'il est dangereux de citer des nombres trop précis à propos des chutes de tension aux balais et M. Perrier y a fait attention dans une certaine mesure. Il a effectué lui-même des mesures de résistance de balais vers 1902 ou 1903, les résultats obtenus étaient souvent déconcertants, il arrivait que, dans les mêmes conditions, on ne trouvait pas deux fois la même valeur de la résistance. Il fit des essais nombreux sur des collecteurs à lames et constata que des perturbations, en apparence les plus étrangères à l'essai, provoquaient des déviations du voltmètre. Il pensa que le contact s'établissait par l'intermédiaire d'arcs infiniment petits qui existent même si on ne les aperçoit pas. En 1913, il émit l'hypothèse de l'ionisation.

Il y aurait beaucoup à dire sur l'ionisation qui est fondamentale dans la théorie de la commutation. Elle explique les incidents qui peuvent se manifester sans cause apparente après trois ou quatre jours d'un fonctionnement satisfaisant.

La chute de tension diminue avec l'ionisation de l'espace. Ce fut une erreur d'introduire du cuivre dans les balais ; au contact charbon-cuivre on a substitué le contact cuivre-cuivre, ce qui fut une cause d'insuccès. Il demande à M. Perrier d'indiquer la chute de tension obtenue pour des courants infimes.

M. PERRIER répond qu'il a essayé de la déterminer en considérant la tangente à l'origine ; elle serait de l'ordre de 1 V par polarité à vide.

M. GRATZMULLER dit être surpris qu'on ait pu pousser la précision des mesures jusqu'à mettre en évidence des écarts de 10 p. 100 dans les chutes de tension correspondant à chacune des polarités ; il rappelle les remarques qu'il a faites dans la bibliographie ci-dessous : (1)

M. GIRAULT cite le cas d'une machine d'électrolyse assez bruyante au collecteur pendant la marche à vide et qui devenait plus silencieuse en charge ; il demande à M. Perrier comment, à son avis, on peut expliquer ce phénomène.

M. PERRIER pense que celui-ci est dû à la variation du coefficient de frottement des balais sur le collecteur qui, très grand pendant la marche à vide, diminue beaucoup avec la densité de courant.

Il rappelle les inconvénients de la marche à vide sur la conservation des balais, indiqués au cours de sa communication (cas des locomotives remorquées en ce qui concerne les moteurs de traction).

Un autre phénomène à signaler est un effet de soupape qui se produit pendant la marche en charge et maintient les balais sur le collecteur alors que ceux-ci jouent plus librement à vide.

A une question de M. PESTARINI demandant quelle est la densité de courant optima, il répond que celle-ci peut être de l'ordre de 2 A.mm², ce qui est d'ailleurs parfois insuffisant. Il rappelle enfin que l'action du courant arrive à changer la nature des surfaces et que Siemens a fait breveter des balais striés impolissables.

(1) *Bulletin S. F. E.*, Tome III, n° 21. — Remarques au sujet de la conférence de M. MAUDUIT sur la Théorie générale de la commutation. Base d'une nouvelle théorie.

1914. *Bulletin S. F. E.*, 3^e série, Tome IV, n° 31. — Rappel d'une théorie générale de la commutation. Quelques-unes de ses conséquences.

Lumière Electrique, 15 mars 1913. — Mesure de la valeur de la résistance de contact des balais en charbon sur les collecteurs dans quelques conditions différentes.

Bulletin S. F. E. Septembre 1926. — Rapport sur la production des arcs dans le matériel de traction à courant continu.

Bulletin S. F. E. Janvier 1927. — Discussion du rapport de M. BERGER. Quelques idées sur la commutation des moteurs à courants alternatifs à collecteur.

APPAREIL « MADER-OTT » POUR L'ANALYSE DES COURBES PÉRIODIQUES ⁽¹⁾

par M. HEYBERGER

du Laboratoire d'Essais du Conservatoire National des Arts et Métiers.

Généralités sur la série de Fourier. — Description de l'analyseur « Mader-Ott ». — Mode d'emploi. — Théorie du fonctionnement.

I. Généralités sur la série de Fourier

On sait qu'une fonction périodique de forme quelconque et de période fondamentale D , peut être représentée par une série de Fourier, de la forme :

$$y = f(x) = A_0 + A_1 \cos \omega x + A_2 \cos 2\omega x + \dots + A_l \cos l\omega x + \dots \\ + B_1 \sin \omega x + B_2 \sin 2\omega x + \dots + B_l \sin l\omega x + \dots$$

avec
$$\omega = \frac{2\pi}{D}.$$

Les valeurs des coefficients de cette série sont données par les formules suivantes, dites d'Euler :

$$A_0 = \frac{1}{D} \int_0^D y dx, \\ A_l = \frac{2}{D} \int_0^D y \cdot \cos(l\omega x) dx, \\ B_l = \frac{2}{D} \int_0^D y \cdot \sin(l\omega x) dx.$$

Dans certains cas, lorsque la fonction périodique à analyser est représentée par certaines lignes brisées ou par certaines courbes, les intégrales ci-dessus peuvent être calculées ; sinon, il faut recourir aux solutions graphiques connues.

La détermination graphique des coefficients de la série de Fourier se ramène à une mesure d'aires et peut donc s'effectuer avec un planimètre ; pour éviter toute représentation graphique, il est nécessaire de compléter le planimètre par un appareil qui, en suivant la courbe à

(1) Communication présentée à la séance du 8 février 1930 de la 6^e Section de la Société Française des Electriciens, sous la Présidence de M. CELLERIER.

analyser, fait suivre à la pointe du planimètre le contour des aires non dessinées à analyser.

L'analyseur « Mader-Ott » est l'un des appareils imaginés dans ce but.

II. Description de l'analyseur « Mader-Ott ».

Il se compose essentiellement d'un *chariot* W pouvant se déplacer le long d'une règle fixe et portant 3 organes mobiles :

a) un levier TKO coudé à angle droit, pouvant tourner autour d'un pivot à bille K ; l'un des bras, KO, est gradué en mm et porte une pointe destinée à suivre la courbe à analyser ;

b) une crémaillère ZZ' pouvant comme le chariot se déplacer parallèlement à la règle fixe ; cet organe est commandé par l'extrémité T du bras TO du levier coudé ;

c) un disque denté D, engrenant avec la crémaillère et présentant 2 petites cavités marquées C et S destinées à recevoir la pointe du planimètre accouplé à l'analyseur.

III. Mode d'emploi

Soient $OB=D$ la période de la courbe à analyser et M le milieu de cette période. Une règle à dessin, accompagnant l'analyseur, est adaptée à la règle fixe et placée sur le segment rectiligne OB de telle façon que son zéro coïncide avec M ; dans ces conditions, le point M et le pivot K sont sur une même perpendiculaire à l'axe OB ; on fait glisser la pointe de l'analyseur sur le bras KO de façon qu'elle se trouve en face de la division de ce bras identique à celle de la règle à dessin qui se trouvait en face de O ou de B. On dispose sur le chariot le disque denté correspondant à l'harmonique cherché, puis on place la pointe du planimètre successivement dans les cavités C et S. Dès lors, l'appareil est prêt à fonctionner :

On amène la pointe traceuse de l'analyseur sur l'origine O et on fait une lecture sur le planimètre ; on suit la courbe de O en B puis on revient en O en suivant l'axe BO ; on fait alors une deuxième lecture sur le planimètre ; la différence entre des deux lectures donne directement, sans aucune construction graphique, la valeur du coefficient cherché.

IV. *Théorie du fonctionnement de l'analyseur « Mader-Ott ».*

Choisissons comme axe des abscisses l'axe OB et comme axe des coordonnées la perpendiculaire en O à l'axe OB.

Soient g et b l'ordonnée et l'abscisse du centre E du disque denté, R le rayon de ce disque, r la distance du centre de ce disque aux cavités

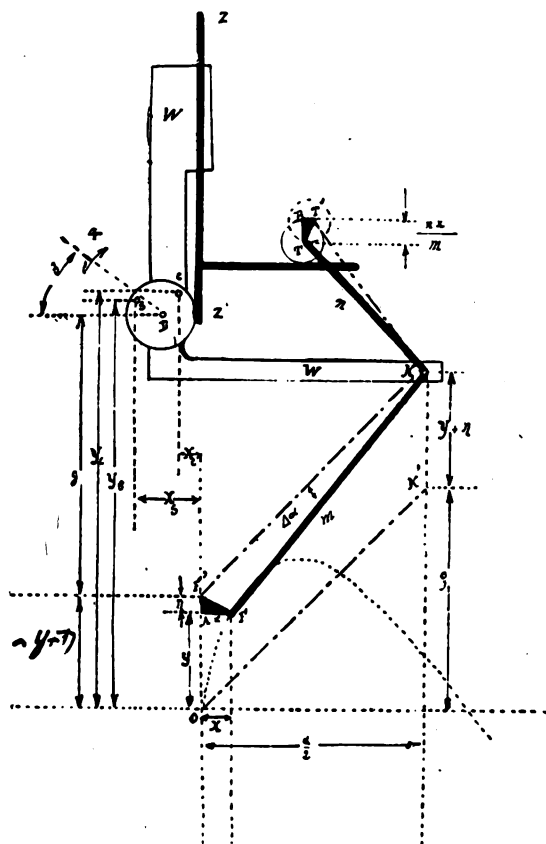


FIG. 1.

C et S , m et n les longueurs respectives des bras KF et KT du levier coudé, et D la période OB de la courbe à analyser.

Lorsque la pointe de l'analyseur est en O , ES et EC du disque denté sont respectivement parallèles aux axes Ox et Oy (fig. 1). Les coordonnées de s et de c sont :

$$S \begin{cases} x_s = -(b + r) \\ y_s = g \end{cases} \quad \text{et} \quad C \begin{cases} x_c = -b \\ y_c = g + r. \end{cases}$$

Le déplacement de la pointe de l'analyseur de O à un point F, de coordonnées x et y de la courbe peut se décomposer en 2 mouvements:

a) un *mouvement de translation* sur l'axe des y , de O en F' produisant un déplacement du chariot de $y + \eta$

b) un *mouvement de rotation* d'un angle $\Delta\alpha$ du levier coudé autour du point K correspondant à un déplacement de la pointe de F' en F.

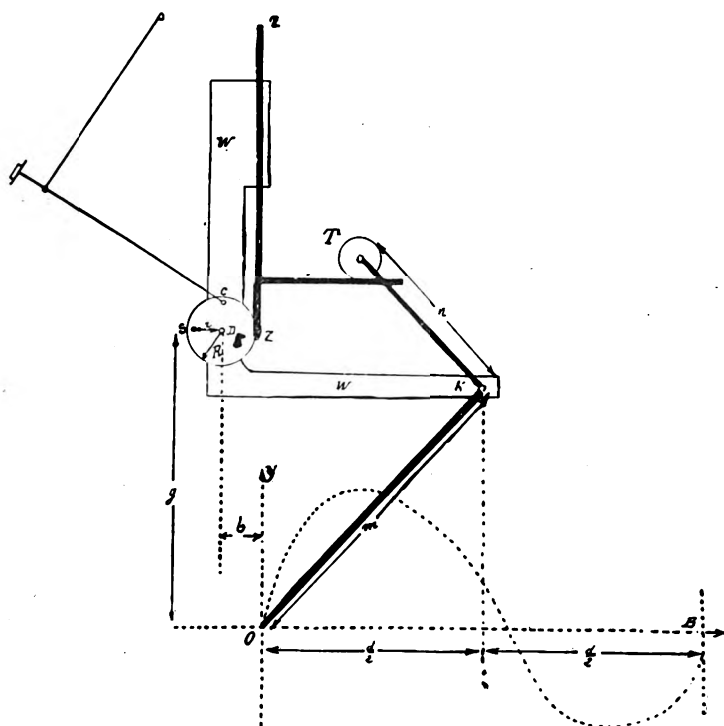


FIG. 2.

Le déplacement BT de la crémaillère, résultant de cette rotation est égal à $\frac{xn}{m}$ (les petits triangles rectangles FF'A et TTB sont semblables);

il fait tourner le disque denté d'un angle égal à $\beta = \frac{x \cdot n}{R \cdot m}$.

Les nouvelles coordonnées de C et de S sont donc :

$$C \begin{cases} x_c = -b + r \sin \beta \\ y_c = g + y + \eta + r \cos \beta \end{cases} \quad S \begin{cases} x_s = -(b + r \cos \beta) \\ y_s = g + y + \eta + r \sin \beta. \end{cases}$$

Lorsqu'on revient de B en O en suivant l'axe BO, les coordonnées de C et de S sont :

$$C \begin{cases} x_c = -b + r \sin \beta \\ y_c = g + \eta + r \cos \beta \end{cases} \quad S \begin{cases} x_s = -(b + r \cos \beta) \\ y_s = g + \eta + r \sin \beta. \end{cases} \quad (y = 0).$$

Les aires comprises à l'intérieur des courbes tracées par les points C et S sont donc :

$$\begin{aligned} \text{Aire } C &= \int_0^D (g + y + \eta + r \cos \beta) d(-b + r \sin \beta) - \int_D^0 (g + \eta + r \cos \beta) d(-b + r \sin \beta) \\ &= \int_0^D y d(-b + r \sin \beta) = r \int_0^D y d(\sin \beta). \end{aligned}$$

De même

$$\begin{aligned} \text{Aire } S &= \int_0^D (g + y + \eta + r \sin \beta) d(-b - r \cos \beta) - \int_D^0 (g + \eta + r \sin \beta) d(-b - r \cos \beta) \\ &= \int_0^D y d(-b - r \cos \beta) = -r \int_0^D y d(\cos \beta). \end{aligned}$$

Or :

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{x \cdot n}{R \cdot m} \quad \sin \beta = \sin \frac{x n}{R \cdot m}; \quad d(\sin \beta) = \frac{n}{R \cdot m} \cos \frac{n}{R \cdot m} x \cdot dx, \\ \cos \beta &= \cos \frac{x n}{R \cdot m}; \quad d(\cos \beta) = -\frac{n}{R \cdot m} \sin \frac{n \cdot x}{R \cdot m} dx. \end{aligned}$$

Par suite :

$$\text{Aire } C = \frac{r \cdot n}{R \cdot m} \int_0^D y \cos \frac{n \cdot x}{R \cdot m} dx.$$

$$\text{Aire } S = \frac{r \cdot n}{R \cdot m} \int_0^D y \sin \frac{n \cdot x}{R \cdot m} dx.$$

Si l'on donne à R et à r les valeurs suivantes :

$$R = D \cdot \frac{n}{m} \cdot \frac{1}{2\pi l} \quad \text{et} \quad r = \frac{1}{l\pi} \quad (l, \text{rang de l'harmonique}),$$

on aura

$$\begin{aligned} \text{Aire } C &= \frac{\frac{n}{l\pi}}{D \cdot \frac{n}{m} \cdot \frac{1}{2\pi l}} \int_0^D y \cos \frac{nx}{D \cdot \frac{n}{m} \cdot \frac{1}{2\pi l}} dx \\ &= \frac{2}{D} \int_0^D y \cos \left(\frac{2\pi}{D} lx \right) dx = \frac{2}{D} \int_0^D y \cos(lx) dx, \end{aligned}$$

ou enfin : $\text{Aire } C = A_l$ (coefficient cherché).

On trouve de même :

$$\text{Aire } S = B_l.$$

L'appareil donne donc bien directement les coefficients de la série de Fourier de la fonction à analyser.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

APPAREILLAGE

Appareillage électrique haute tension (Théorie, Construction, Applications), par Ch. BRESSON, Ingénieur en chef des Ateliers de Delle. — Dunod, éditeur.

Dans cet ouvrage, l'auteur donne un exposé très complet de tous les problèmes concernant l'appareillage à haute tension dont l'importance s'accroît chaque jour du fait du développement des réseaux de transport d'énergie et de la valeur de plus en plus grande des puissances mises en jeu. Après avoir rappelé les règles de normalisation du matériel et les formules fondamentales concernant les effets de capacité dont l'application aux isolateurs de types divers et aux isolants fait l'objet d'un chapitre substantiel, il étudie les problèmes d'échauffement ainsi que les phénomènes de décharge par arc dans les gaz et les liquides isolants; puis les phénomènes thermiques et électrodynamiques provoqués par les courts-circuits. Les deux chapitres qui suivent, consacrés aux principes de construction de l'appareillage d'interruption, au rôle de cet appareillage et à son installation, contiennent de nombreux exemples de réalisation. Un dernier chapitre, qui ne sera pas le moins apprécié par les exploitants, traite du calcul des courants de courts-circuits ainsi que des phénomènes de sursensions et décrit les appareils les plus récents, utilisés pour en limiter les effets.

Les nombreuses formules données dans le texte sont accompagnées d'exemples numériques et de données pratiques.

Par sa documentation très complète, cet ouvrage rendra les plus grands services aux Ingénieurs électriciens, aussi bien aux constructeurs chargés de l'étude et de la réalisation des appareils qu'aux exploitants.

TÉLÉGRAPHIE. — TÉLÉPHONIE

Installations téléphoniques (Descriptions et fonctionnement des appareils.

Montage des postes d'abonnés et des postes centraux). — Guide pratique à l'usage du personnel des P. T. T. et des monteurs électriciens, d'après l'ouvrage de J. SCHILS et C. CORNET, par R. PARESY, Ingénieur en chef des Télégraphes. — 6^e édition. — Dunod, éditeur, 92, rue Bonaparte, Paris (6^e).

On trouvera dans cet ouvrage un exposé des principes de la téléphonie puis la description détaillée des différents organes et appareils accessoires d'une installation (récepteurs, microphones, bobines d'induction, piles, appareils de protection et d'appel, commutateurs, relais, etc.).

L'auteur étudie ensuite divers systèmes d'installations, chez l'abonné et dans les postes centraux; ces installations-types ont été choisies parmi celles qui jouissent d'une plus grande faveur en raison des facilités d'exploitation qu'elles présentent. Après un aperçu sur la construction des lignes, M. Paresy indique les dispositions propres à accroître l'utilisation des circuits, soit au moyen d'installations d'embrochage, soit par l'adaptation des circuits téléphoniques ou télégraphiques, soit par l'emploi de deux circuits téléphoniques combinés. Il insiste sur les procédés qui permettent d'améliorer la propagation des courants téléphoniques, décrit les dispositifs d'entrée des postes et consacre un chapitre à l'étude des répartiteurs. Il examine ensuite les dérangements qui peuvent se produire dans les installations ainsi que les moyens d'y remédier et termine par un très intéressant exposé des principes de la téléphonie automatique.

Cet ouvrage très complet rendra d'importants services aux monteurs, aux agents des P.T.T., aux installateurs de l'industrie privée ainsi qu'à tous ceux qui ont à surveiller, exécuter ou entretenir des installations téléphoniques.

RECHERCHES PHYSIQUES

Introduction à l'étude de l'Optique appliquée, par CH. FABRY, Professeur à la Sorbonne et à l'Ecole Polytechnique, Directeur de l'Institut d'Optique, Membre de l'Institut. — Un vol. 22 x 15,5 de 160 pages in-8°. — Editions de la Revue d'Optique théorique et instrumentale.

Cet ouvrage débute par un rappel des notions fondamentales nécessaires à l'étude de l'optique, telles que : classification des radiations visibles et invisibles, unités,

modes de mesure, intensité d'un rayonnement, notions de photométrie. On y trouve un paragraphe consacré à l'équivalent mécanique de la lumière, une étude et une description sommaire des diverses sources de lumière, considérées surtout au point de vue de leur brillance et de leur spectre. Un chapitre est consacré aux moyens pratiques d'obtenir des lumières monochromatiques. La plus grande partie de cet ouvrage traite des propriétés des milieux autres que le vide; on y trouve des développements très intéressants sur les indices de réfraction et sur leur mesure exacte.

La fin de l'ouvrage est consacrée aux phénomènes d'interférence et de polarisation. L'auteur, qui a établi des interféromètres d'un usage courant pour la mesure des très petites dimensions, insiste sur l'utilité pratique de l'emploi des premiers.

Les méthodes géophysiques, par Ch. MAURIN, Doyen de la Faculté des Sciences de Paris.

L'auteur définit le but des méthodes géophysiques qui permettent, au moyen d'observations faites à la surface du sol, de connaître la nature des parties de l'écorce terrestre situées à une certaine profondeur au-dessous de la couche superficielle. Ces méthodes sont basées sur l'utilisation de phénomènes tels que la propagation des séismes, les anomalies dans la répartition du magnétisme terrestre, etc... Leur intérêt réside dans les indications qu'on en retire dans la prospection du sous-sol, en vue de l'exploitation des mines, indications dont l'auteur donne divers exemples.

La Structure de la lumière, par Sir J. J. THOMSON, O. M. F. R. S. Traduit par R. FRIC. Préface de M. A. COTTON, Membre de l'Institut.

Dans cette étude, l'auteur cherche à lever la contradiction qui existe entre les preuves fournies sur la nature de la lumière par ses propriétés optiques et par ses propriétés électriques. Les premières conduisent à l'adoption de la théorie ondulatoire, les seconds conduisent à la théorie corpusculaire. Pour concilier ces deux théories, aussi solidement assises l'une que l'autre, l'auteur émet l'hypothèse que les quanta sont constitués par des tubes de force électrique en forme de tore; à cause du choc initial produit au moment de l'émission de la lumière, ces quanta vibrent et sont ainsi entourés d'une zone d'ondes. On conçoit que l'on puisse de la sorte expliquer les phénomènes ondulatoires et corpusculaires, des quanta ainsi constitués pouvant agir soit comme corpuscules par leur masse, soit comme propagateurs d'ondes par la zone qui les entoure.

MESURES

Comptage de l'énergie électrique en courant alternatifs, par J. TARTINVILLE.

— Un vol., vii-154 pages, 108 figures. — Dunod, éditeur. — 35 f. 50.

Cet ouvrage, limité aux compteurs à courants alternatifs, sera consulté avec intérêt par les Ingénieurs s'occupant de la vente de l'énergie électrique.

Après avoir rappelé la méthode des deux wattmètres, l'auteur traite des compteurs d'induction et de l'influence des différentes conditions de fonctionnement sur leur exactitude; il indique en outre certains procédés de réglage. Les chapitres suivants sont successivement consacrés aux principes généraux du comptage de l'énergie active et de l'énergie réactive, au comptage par l'intermédiaire de transformateurs de mesure, en particulier dans le cas de la haute tension pour des installations de moyenne importance.

L'auteur donne quelques renseignements pratiques sur le montage des compteurs, met en garde contre des erreurs courantes de connexion et signale certaines conditions anormales de fonctionnement. Un intéressant chapitre est entièrement consacré à l'examen des différentes fraudes qui peuvent se pratiquer sur les compteurs. On trouve enfin des indications générales sur le choix des compteurs et des renseignements utiles sur le contrôle, la surveillance et l'entretien des appareils.

Un dernier chapitre est consacré à la tarification et à l'étude des compteurs spéciaux (compteurs à dépassement, à tarifs multiples, d'énergie complexe, madi-graphes, etc...).

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS

SOMMAIRE

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

Etablissement de relations et de formules par la considération de dimensions et d'homogénéité (M. BUNET) p. 927.

Rapport sur l'équilibrage hydraulique des stations centrales thermiques (M. MATHIVET) p. 940. — L'Etat actuel du problème de l'interconnexion des réseaux (M. FALLOU) p. 945. — Tendances actuelles dans l'étude des radio-récepteurs commerciaux (M. DELORAINE) p. 965. — Récentes études sur les relais électromagnétiques employés en téléphonie (M. VAN MIERLO) p. 973. — Applications des lois de l'incandescence au calcul des filaments de lampes électriques (M. TRANCHECOSTE) p. 1002.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 1026.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

La reproduction des mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des Auteurs.

Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant le manuscrit.

4^e série, tome X, n° 109.

ÉTABLISSEMENT DE RELATIONS ET DE FORMULES PAR LA CONSIDÉRATION DE DIMENSIONS ET D'HOMOGENÉITÉ ⁽¹⁾

par M. P. BUNET

Il est rappelé dans cette note que la considération de dimensions nous permet une vérification de nos équations dont tous les termes doivent être homogènes, mais que l'utilité de ces dimensions peut, en réalité, dépasser beaucoup celle de cette sorte de « preuve par neuf ». Dans bien des cas, en nous basant sur quelques raisonnements simples et la nécessité de l'homogénéité, nous pouvons écrire rapidement des relations bien plus longues à établir par les procédés rigoureux, peut-être pas toujours avec une sécurité absolue, mais bien souvent avec de très grandes chances d'exactitude, et quelquefois avec une entière certitude. La présente note en montre quelques exemples dans le domaine de l'électricité, avec l'intention de rappeler que ce mode d'investigation rapide a quelque valeur pour l'enseignement et qu'il peut diriger utilement certaines recherches.

Dans ses communications aux séances d'octobre de 1928 et 1929, notre collègue, M. Bayle ⁽²⁾ a attiré notre attention sur les *dimensions des grandeurs physiques* en se plaçant à un point de vue particulier qui n'est pas celui dont nous nous occuperons aujourd'hui.

Ce second point de vue, sans doute pas assez connu, n'est d'ailleurs pas nouveau et il a été quelquefois exposé dans l'enseignement. Son utilité n'a pas non plus échappé à certains établissements dans lesquels se manient beaucoup de formules et pendant même que nous rédigeons cette note, nous avons reçu un numéro de *General Electric Review* ⁽³⁾ dans lequel l'auteur expose l'aide qu'apporte l'analyse dimensionnelle à la solution de nombreux problèmes, et il nous informe que ce procédé d'investigation a reçu une extension considérable dans le Bureau of Standards, dont nous connaissons tous la réputation.

Nous n'insisterons pas sur la vérification rapide des formules ap-

(1) Ce rapport sera présenté et discuté au cours de la Semaine de discussions de novembre, le vendredi 28 novembre 1930.

(2) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, novembre 1928 : Les calculs physiques et leurs unités. — Septembre 1929 : Universalité nécessaire du système métrique.

(3) *General electric review*. — Avril 1930. — B. L. Robertson : Dimensional analysis.

portées par la constatation de l'homogénéité des différents termes. Nous obtenons facilement la dimension de toutes les grandeurs, exprimée dans le système d'unités dont nous nous servons ; nous trouvons ces dimensions toutes prêtes dans les tableaux de divers ouvrages. La constatation de l'homogénéité n'est pas une preuve d'exactitude ; mais toute divergence dans l'homogénéité des termes d'une équation est une preuve d'inexactitude. On a ainsi une vérification de l'ordre de celle que procure la preuve par 9 des multiplications et des divisions.

Mais on peut aller bien plus loin dans l'emploi des dimensions. Il arrive souvent que la nécessité de l'homogénéité d'une formule recherchée impose la forme de cette relation et permet de l'écrire entièrement, aux coefficients numériques près, par la simple considération des dimensions des grandeurs qui doivent y entrer seules. On peut quelquefois rejeter de la formule des grandeurs que l'on pourrait être tenté d'y faire entrer ; l'attention est attirée sur d'autres qui doivent intervenir et que l'on aurait négligées.

Pour bien l'expliquer, rien ne vaut un exemple, et nous rappellerons le cas déjà exposé du pendule simple : nous en sommes à Galilée sortant de la cathédrale de Pise, ayant reconnu expérimentalement que les oscillations de faible amplitude d'un pendule sont isochrones. Cherchons la durée des oscillations.

Pour cela, voyons les quantités qui peuvent intervenir. La longueur du pendule l intervient certainement ; il en est de même pour la pesanteur, par l'accélération g ; la masse m du corps suspendu peut aussi intervenir ; quant aux dimensions de ce corps, nous n'aurons pas à en tenir compte si nous les supposons négligeables, le corps étant assimilé à un point matériel par hypothèse. Peut-être la nature du fil de suspension doit-elle intervenir ? Mais nous le supposons rigide et inextensible, de masse négligeable devant m , de dimensions transversales négligeables devant sa longueur. Il nous reste donc à mettre en présence t la durée de l'oscillation, m la masse du corps oscillant, g l'accélération de la pesanteur et l la longueur depuis le point de suspension jusqu'au corps suspendu.

D'autre part, la formule doit être simple, et on voit tout de suite que la valeur de t ne peut être une somme de termes contenant les uns m , les autres g ou l , avec de simples coefficients numériques, t ne contenant que le temps T . Nous désignons par de grandes lettres les dimensions des unités fondamentales C.G.S.

En cherchant bien, nous ne pourrions écrire que :

$$t = K l^x g^y m^z,$$

K étant une grandeur numérique, sans dimensions, au cours de toute cette note.

Ecrivons que la formule doit être homogène. Si nous trouvons ainsi une série de groupes de valeurs possibles de x , y , z , nous devons admettre la possibilité de t représenté par la somme de termes :

$$t = \Sigma K l^x g^y m^z,$$

et, pour l'homogénéité,

$$T = L^x \cdot L^y T^{-2y} \cdot M^z$$

D'où d'abord $z=0$: la durée de l'oscillation est forcément indépendante de la masse du corps oscillant.

Puis la seule solution

$$x = \frac{1}{2} \text{ et } y = -\frac{1}{2}$$

d'où

$$t = K l^{1/2} g^{-1/2} = K \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Ensuite quand nous diminuerons nos restrictions, nous aurons à rechercher des termes correctifs qui ne devront pas troubler l'homogénéité. Nous ne poursuivrons pas ces développements et nous passerons à quelques applications électriques.

FORCE PORTANTE D'UN ÉLECTRO-AIMANT

Nous avons un noyau de fer circulaire de rayon r sur lequel repose une armature de même substance. Le noyau est aimanté avec une induction constante $\mathfrak{B}$. Nous cherchons la force qui s'exerce entre le noyau et l'armature.

Peuvent seulement intervenir $\mathfrak{B}$ et r ; le flux, la perméabilité sont déterminés par ces deux grandeurs ; nous ne voyons rien d'autre qui pourrait intervenir. Si $\mathfrak{B} = 0$, le fer n'étant pas aimanté, la force est nulle, elle est nulle aussi pour $r=0$; $\mathfrak{B}$ et r ne contiennent pas d'ailleurs les mêmes unités fondamentales dans leurs dimensions, que nous évaluons dans le système électromagnétique C.G.S. Nous sommes ainsi amenés à

$$f = \varphi(\mathfrak{B}, r) = \mathfrak{B}^a r^b$$

et pour les dimensions

$$L M T^{-2} = L^{\frac{-x}{2}} M^{\frac{x}{2}} T^{-x} \cdot L^y$$

d'où

$$-\frac{x}{2} + y = 1$$

$$\frac{x}{2} = 1$$

$$x = 2$$

Ces deux dernières équations sont identiques, et cela doit toujours avoir lieu dans le cas de plus d'équations que d'inconnues ; le contraire nous indiquerait que nous avons fait quelque erreur.

De là on tire $y=2$ et la force est $f = K \mathfrak{B}^2 r^2$.

Nous savons que la formule réelle est $f = \frac{\mathfrak{B}^2 s}{8\pi}$.

si s désigne la section πr^2 .

Une seule expérience suffira donc pour déterminer K qui sera valable dans tous les autres cas.

Nous sommes sûrs qu'il est impossible de représenter l'attraction par une autre formule contenant $\mathfrak{B}^4$ ou s^3 , etc.

CHARGE ET DÉCHARGE D'UN CONDENSATEUR

On place, avec une tension u de forme quelconque, et en série, un condensateur de capacité c , une self-inductance l et une résistance r . Il en résulte un courant i variable dans le temps. Ce courant traversant à la file l , r , c , formons les produits, avec les dimensions électromagnétiques C.G.S.

$$l i \text{ de dimensions } L \cdot L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$$

$$r i \text{ de dimensions } L T^{-1} \cdot L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}$$

$$c i \text{ de dimensions } L^{-1} T^2 \cdot L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} = L^{-\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T$$

$$\text{et } u \text{ est de dimensions } L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$$

Nous voyons une grande parenté dans ces produits, le temps étant mis à part, à l'exception du troisième terme. Cela nous indique que nous n'avons pas bien opéré en ce qui le concerne ; nous remarquons alors que si nous avons placé c en dénominateur, nous aurions obtenu

$$L T^{-2} \cdot L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-3}$$

Nous établissons ainsi l'analogie complète entre

$$\frac{l i}{t^2} \quad \frac{r i}{t} \quad \frac{i}{c} \quad \frac{u}{t}$$

Et si nous avons l'intuition que ces quantités entrent dans une équation différentielle, cela nous suggère qu'il faut examiner tout particulièrement, comme pouvant représenter ce qui se passe, l'équation :

$$K_1 l \frac{d^2 i}{dt^2} + K_2 r \frac{di}{dt} + K_3 \frac{i}{c} + \frac{du}{dt} = 0$$

Nous savons bien que cette équation est exacte, et l'intérêt de ce qui précède est seulement de souligner comment l'on peut opérer dans d'autres cas non encore aussi bien traités.

DÉCHARGE DU CONDENSATEUR

Mettons de côté cette équation. Supposons seulement que nous ayons fait quelques expériences nous indiquant que la décharge est oscillante si r est faible ; nous en sommes au miroir tournant de Feddersen. Cherchons l'expression de la fréquence d'oscillation. Remarquons que si nous trouvons celle que nous donnerait la résolution de l'équation différentielle, nous avons fait un grand pas dans la voie de la certitude.

La fréquence de l'oscillation ne peut dépendre que de la capacité du condensateur, de la tension à ses bornes au début et de la self-inductance sur laquelle est fermé le condensateur, si l'on suppose la résistance de ce circuit de décharge nulle ou négligeable

$$f = \varphi(u, c, l).$$

Nous voyons immédiatement en examinant les dimensions, soit

$$L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2} \text{ pour } u, L^{-1} T^2 \text{ pour } c, L \text{ pour } l, T^{-1} \text{ pour } f,$$

que jamais nous ne pourrions faire entrer u dans une formule où n'entreraient, à part lui, que c , l , f avec des coefficients numériques, à cause de la présence de M dans ses seules dimensions. Nous trouvons ainsi, par cette seule remarque, cette loi importante : *La fréquence des oscillations est indépendante de la tension.*

Il reste ainsi $f = \varphi(c, l)$.

Pour la même raison d'homogénéité, les termes c et l ne peuvent se séparer puisque la dimension L n'apparaît plus dans la valeur de f ; ce sont les exposants de c et l qui, par combinaison de ces deux quan-

tités, font disparaître L de la fonction φ ; il ne peut donc y avoir que la solution :

$$f = \Sigma c^x l^y,$$

et pour les dimensions

$$T^{-1} = L^{-x} T^{2x} . L^y$$

Il ne peut y avoir qu'un terme avec $x = y = -\frac{1}{2}$, et la solution ne peut être que

$$f = K c^{\frac{1}{2}} l^{\frac{1}{2}} = K \sqrt{\frac{1}{c l}}$$

Un unique essai nous suffira pour avoir $K = 2\pi$.

Cette formule nous est bien donnée par la résolution de l'équation différentielle ci-dessus.

Nous pouvons essayer d'aller plus loin en recherchant l'influence de la résistance dès qu'elle n'est plus négligeable. La fréquence diminue, car quelques expériences, avec miroirs tournants notamment, nous montreront que le courant de décharge reste de même sens (fréquence nulle ou imaginaire) au delà d'une certaine valeur de r .

Ceci considéré, la formule complète doit être de la forme

$$f = K \sqrt{\frac{1}{c l} - A}$$

A est une somme de termes qui croît lorsque r croît, que nous développerons en série, avec puissances croissantes de r

$$A = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \dots$$

Chacun des termes a contient r , l , c et pas autre chose, car l'homogénéité nous force encore à éliminer u , puisqu'elle contient seule M et que tous les termes a doivent être homogènes avec T^{-1}

$$a = c^x l^y r^z$$

ou, pour les dimensions

$$T^{-2} = L^{-x} T^{2x} . L^y . L^z T^{-1}$$

d'où

$$\begin{aligned} -x + y + z &= 0 \\ 2x - z &= -2 \end{aligned}$$

Telles sont les conditions que doivent remplir les termes a .

Nous pourrions ainsi prendre une série de termes ; en nous engageant sur un terrain peut-être moins solide, mais à explorer en premier lieu si nous en étions réellement à la recherche de la formule, nous remarquerons que l'énergie contenue dans le condensateur passe

dans l'inductance sous forme $l i^2$, puis revient dans le condensateur, etc. La résistance a deux effets : elle amortit l'oscillation, elle réduit sa fréquence. Ces effets proviennent de l'absorption d'une puissance $r i^2$ transformée en chaleur dans la résistance, réduisant ainsi progressivement l'énergie qui peut s'accumuler dans l'inductance. r doit entrer aux numérateurs des termes a , qui s'annulent pour $r=0$, et par contre, l doit figurer aux dénominateurs puisque r et l ont des effets opposés ; on est conduit à leur donner des exposants égaux puisque r et l se multiplient par la même puissance de i , soit 2, dans cette dégradation en chaleur de l'énergie du condensateur.

Si nous faisons ainsi $y=-z$ nous obtenons $x=0$, $z=2$, $y=-2$ et il n'y a plus qu'un seul terme possible de forme $K_1 \frac{r^2}{l^2}$, la fréquence

$$\text{étant } f = K \sqrt{\frac{1}{cl} - K_1 \frac{r^2}{l^2}}$$

On sait que la formule exacte est $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{cl} - \frac{r^2}{4l^2}}$

CHAMP DONNÉ PAR UN CONDUCTEUR RECTILIGNE INFINI ET FINI

Un conducteur de longueur indéfinie est parcouru par un courant i . Quel est le champ magnétique à une distance d de ce conducteur ? Les dimensions transversales du conducteur sont négligeables devant cette distance.

Le champ ne peut alors dépendre que du courant et de la distance, la formule donnant $\mathfrak{x}$ ne devant contenir que des valeurs numériques et ces deux quantités ; comme elles ne sont pas homogènes entre elles, ni avec le champ, il ne peut y avoir plusieurs termes additionnés contenant les uns i les autres d . Ils sont tous de la forme $i^x d^y$.

Les dimensions de $\mathfrak{x}$ sont $L^{-\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$, les dimensions de i sont $L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$; l'équation des dimensions est ainsi :

$$L^{-\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} = L^{\frac{x}{2}} M^{\frac{x}{2}} T^{-x} \cdot L^y$$

d'où les relations

$$\frac{x}{2} + y = -\frac{1}{2}$$

$$\frac{x}{2} = \frac{1}{2}$$

$$x = 1$$

Les deux dernières sont identiques et il ne peut en être autrement si nous n'avons pas fait d'erreur, puisqu'il n'y a que deux variables pour trois équations. Donc $x=1$ et $y=-1$, d'où $\mathcal{E} = K \frac{i}{d}$.

Si le conducteur est de longueur finie $2l$, le champ sur une perpendiculaire élevée au milieu, et à une distance d sera plus faible que le précédent, puisque nous supprimons l'effet, de même sens, des extrémités.

Nous poserons

$$\mathcal{E} = K \frac{i}{d} [1 + A]$$

A est une somme de termes correctifs, de signe négatif, donc chacun n'a pas de dimensions. A augmente lorsque l'échelle $\frac{d}{l}$ augmente, c'est-à-dire que le conducteur se raccourcit relativement à la distance à laquelle on veut obtenir le champ ; A est donc de forme

$\Sigma \frac{d^n}{l^n}$, avec le même exposant en haut et en bas, et comme il faut évidemment obtenir la même valeur de $\mathcal{E}$ changée de signe en passant de $+d$ à $-d$, nous sommes conduits à

$$\mathcal{E} = K \frac{i}{d} \left[1 + a_1 \frac{d^2}{l^2} + a_2 \frac{d^4}{l^4} + a_3 \frac{d^6}{l^6} + \dots \right]$$

La formule exacte est bien :

$$\mathcal{E} = 2 \frac{i}{d} \sqrt{1 + \frac{d^2}{l^2}}$$

qui, développée en série, donne :

$$\mathcal{E} = 2 \frac{i}{d} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{d^2}{l^2} + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \frac{d^4}{l^4} - \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} \frac{d^6}{l^6} + \dots \right)$$

FORCES ENTRE DEUX CONDUCTEURS PARALLÈLES

Si l'on a un conducteur indéfini traversé par un courant i et un conducteur parallèle à distance d traversé par un courant i' , il s'exerce une force normale que nous montre immédiatement l'expérience. Si f désigne la force par unité de longueur du second conducteur, il ne peut intervenir dans son expression que d , i , i' ; $f = \varphi(d, i, i')$ qui ne peut être que de forme $\Sigma K \frac{(i i')^x}{d^y}$, puisque la force s'annule avec les courants et décroît évidemment avec la distance. Quelles sont les valeurs de x et y possibles ?

Les dimensions de f sont $L M T^{-2}$. $L^{-1} = M T^{-2}$

Les dimensions de i sont $L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$

L'équation des dimensions est ainsi

$$M T^{-2} = L^x M^y T^{-2y} \cdot L^{-y}$$

D'où

$$x - y = 0 \quad \text{et} \quad \begin{cases} x = 1 \\ 2x = 2 \end{cases}$$

De là, une seule solution possible pour que l'homogénéité soit satisfaite ; c'est $f = K \frac{i i'}{d}$

Les deux conducteurs peuvent être placés dans un milieu de perméabilité μ , ou dans un milieu de constante diélectrique ϵ . Ces quantités physiques ne doivent-elles pas intervenir dans nos formules ? Les traités les négligent trop souvent, soit dit en passant.

Le calcul ci-dessus est fait dans le système électromagnétique, qui est impuissant en ce qui concerne la perméabilité puisque celle-ci n'y a pas de dimensions. Il est donc meilleur de nous adresser à un autre système d'unités, dans lequel la perméabilité a des dimensions. Prenons le système électrostatique. Les dimensions de i sont $L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}$; celles de $i' : d$ sont donc $L^2 M T^{-4}$. La force par unité de longueur reste de dimensions $M T^{-2}$. Il faut ainsi multiplier $\frac{i i'}{d}$ par quelque chose de dimensions $L^{-2} T^2$ dans le système électrostatique et 0 dans le système électromagnétique. C'est précisément la perméabilité et la formule est réellement $f = K \mu \frac{i i'}{d}$. Une seule expérience nous apprendra que $K=2$.

Quant à la constante diélectrique, de dimensions 0 dans le système électrostatique, de dimensions $L^{-2} T^2$ dans le système électromagnétique, le même genre de raisonnement nous montre qu'il est impossible de l'introduire dans la formule. Nous arrivons ainsi très simplement à ceci :

Les forces qui s'exercent entre deux conducteurs traversés par des courants sont proportionnelles à la perméabilité du milieu dans lequel sont plongés les conducteurs ; elles sont indépendantes de la constante diélectrique de ce milieu.

PINCEMENT DES CONDUCTEURS LIQUIDES

Le pincement est l'attraction des filets de courant d'un conducteur liquide, qui tend à resserrer tous ces filets au centre du conducteur, créant ainsi une pression qui appuie sur le conducteur comme si on le forçait dans un tube de caoutchouc de plus petit diamètre. Prenons un conducteur circulaire ; la pression exercée sur ce conducteur est de forme $p = \varphi(i, r)$ ne contenant que i , r et des constantes sans dimensions ; p s'annule évidemment avec i ; il diminue avec r ; il est donc de la forme $p = K i^x r^y$ ou une somme de termes de cette espèce. L'équation des dimensions sera :

$$L^{-1} M T^{-2} = L^{\frac{x}{2}} M^{\frac{x}{2}} T^{-x} L^y,$$

d'où

$$\begin{aligned} \frac{x}{2} + y &= 1 \\ \left\{ \begin{array}{l} x = 2 \\ \frac{x}{2} = 1 \end{array} \right\} &\text{ identiques} \end{aligned}$$

Une seule solution est donc possible ; c'est $p = K \frac{i^2}{r^2}$, la formule exacte étant $p = \frac{i^2}{2\pi r^2}$

Supposons le conducteur possédant une perméabilité différente de 1. Le calcul ci-dessus ne peut nous montrer comment elle intervient, puisque cette grandeur n'a pas de dimensions dans le système électromagnétique que nous avons employé. Passons encore au système électrostatique. Les dimensions de $\frac{i^2}{r^2}$ sont $L M T^{-2}$; celles d'une pression $L^{-1} M T^{-2}$. Il faut donc multiplier le second membre par une quantité homogène à $L^{-2} T^2$ dans le système électrostatique, sans dimensions dans le système électromagnétique. Ce ne peut être que la perméabilité et $p = K \frac{i^2 \mu}{r^2}$, soit en réalité $\frac{i^2 \mu}{2\pi r^2}$. Nous aurions pu d'ailleurs le déduire immédiatement de ce que nous avons déjà dit au sujet de la perméabilité dans le chapitre précédent.

Cette pression s'exerce, comme on le sait, sous forme pratique, dans des fours à induction employés pour la fusion de l'acier. Le métal fondu n'est plus ferromagnétique ; il est paramagnétique, mais il ne paraît pas démontré que la perméabilité de tous les corps ferreux fondus soit exactement l'unité.

ACTION D'UN PLAN CHARGÉ INDÉFINI SUR UN POINT CHARGÉ

Le point chargé d'une quantité d'électricité q est à une distance a d'un plan indéfini sur lequel la densité électrique est σ . Chaque élément du plan, de surface ds , contient une quantité σds , ce qui donne lieu à une force $f = \frac{q \sigma ds}{r^2}$, avec le point chargé à la distance r de l'élément de surface.

Toutes les forces élémentaires sont ainsi proportionnelles à $q\sigma$. La force totale le sera donc aussi et on pourra écrire pour cette force f : $f = K q \sigma a^x$, ou une somme de termes de cette espèce.

Dans le système électrostatique, les dimensions de q sont $L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$, celles de σ sont $L^{-\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$, celles de $q \sigma$ sont $L M T^{-2}$, qui sont précisément celles de f . Donc $x=0$, et nous trouvons ainsi cette remarque intéressante :

La force est indépendante de la distance du point au plan.

La perméabilité du milieu entre le point et le plan ayant des dimensions dans le système électrostatique, nous savons aussi que *la force ne dépend pas de cette perméabilité.*

Par contre, la constante diélectrique n'ayant pas de dimensions dans le système électrostatique, nous ne pouvons savoir ainsi si elle doit apparaître dans la formule.

Faisons le calcul dans le système électromagnétique ; la dimension de q est $L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}}$, celle de σ est $L^{-\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}}$, celle de $q \sigma$ est $L^{-1} M$; pour passer à $L M T^{-2}$, dimension de f , il faut multiplier $q \sigma$ par $L^2 T^{-2}$ ou diviser par $L^{-2} T^2$, ce qui est précisément la dimension de ϵ . La formule complète est donc $f = K \frac{q \sigma}{\epsilon}$; elle est exactement $f = 2 \pi \frac{q \sigma}{\epsilon}$.

Si nous cherchons d'où vient cet ϵ , nous remontons jusqu'à la loi de Coulomb, et la considération des dimensions nous indique qu'elle est $f = \frac{1}{\epsilon} \frac{q q'}{r^2}$ tandis que beaucoup d'ouvrages indiquent simplement $f = \frac{q q'}{r^2}$ sans commentaires.

EFFET KELVIN

Nous avons fait l'expérience suivante : nous avons pris des plaques de cuivre très larges et nous avons mesuré la puissance dissipée en chaleur, en employant du courant alternatif de fréquence 50 p.s.

La puissance dissipée est mesurée soit au moyen d'un wattmètre, soit au moyen d'un calorimètre. Nous remarquons ainsi que, au delà d'une certaine épaisseur, assez forte, la résistance effective, quotient de la puissance dissipée par le carré du courant, est indépendante de cette épaisseur, qu'elle correspond à une épaisseur utile de cuivre de 1 cm. sur chaque face des plaques. Les mesures sont faites à 60° C, la résistivité du cuivre étant $1,975 \cdot 10^{-6}$. Il s'agit de tirer de là une formule qui nous donnera l'épaisseur utile pour toute autre résistivité, pour toute autre fréquence, et aussi pour toute perméabilité si le conducteur est magnétique. Le problème ainsi posé, nous allons voir que les considérations de dimensions suffisent pour obtenir cette formule générale complète, représentant ce qui se passe avec tout conducteur épais.

L'épaisseur utile, seule à compter sur chaque face, est e ; posons $e = \varphi(q, f, \mu)$. Prenons d'abord un conducteur non magnétique $\mu = 1$, et $e = \varphi(q, f)$. Les dimensions de q dans le système électromagnétique sont $L^2 T^{-1}$, celles de la fréquence T^{-1} . q et f devant se combiner de telle sorte qu'il ne reste que L pour dimensions, on peut représenter e par une suite de termes $q^x f^y$ de telle sorte que $L = L^{2x} T^{-x} T^{-y}$ d'où $x + y = 0$, $x = \frac{1}{2}$, $y = -\frac{1}{2}$, ce qui indique que la formule n'a qu'un terme au second membre et qu'elle est : $e = K \sqrt{\frac{\rho}{f}}$.

Faisons $e = 1$ cm, $q = 1.975$ microhm-cm, $f = 50$ pèr:s, il vient $K = 5030$.

Nous ne pouvons faire entrer μ dans la formule, car il est de dimension zéro. Passons au système électrostatique.

q a pour dimensions T , donc $\sqrt{\frac{\rho}{f}}$ est de dimensions T également. D'autre part, μ étant de dimensions $L^{-1} T^2$, ne peut entrer dans un terme supplémentaire avec une constante purement numérique; il doit donc s'adjoindre à l'unique terme de la formule ci-dessus. Le second membre devant finalement être de dimensions L , il faut lui adjoindre un multiplicateur de dimensions $L T^{-1}$, c'est-à-dire introduire $\sqrt{\mu}$ au dénominateur. La formule complète est ainsi :

$$e = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \cdot 10^9}{\mu f}}.$$

RÉSUMÉ

Nous avons montré le parti que l'on peut tirer de la considération des dimensions, beaucoup plus grand qu'on ne l'imagine souvent. Peut-être nous reprochera-t-on d'avoir présenté ce mode d'investigation sous un jour trop favorable ? Il est bien certain que connaître à l'avance le résultat est un avantage que l'on n'a plus lorsque des recherches s'effectuent dans des directions non encore bien explorées. Mais, dans ce dernier cas, on doit s'attendre à quelques tâtonnements avant d'atteindre la certitude : Connaître une ou plusieurs formules vers lesquelles on doit diriger les recherches ultérieures est parfois un guide précieux ; éliminer des formes de relations qui ne sauraient jamais convenir n'a pas moins d'intérêt bien souvent. Quelquefois encore, l'indécision qui peut se manifester par suite de plusieurs solutions satisfaisant l'homogénéité conduira à la conception d'une expérience éclaircissant la question.

RAPPORT SUR L'ÉQUILIBRAGE HYDRAULIQUE DES STATIONS CENTRALES THERMIQUES ⁽¹⁾

par M. J. MATHIVET

Ingénieur en chef des Travaux du jour aux Mines de Vicoigne, Nœux et Drocourt.

A. — RÉALISATION GÉNÉRALE

Si la station centrale thermique dont on veut équilibrer le graphique de charge ne se trouve pas trop éloignée d'une station centrale hydroélectrique, il sera tout naturel de conjuguer ces deux centrales l'une avec l'autre et de jouer sur le réservoir de charge de la centrale hydroélectrique, de manière à supprimer toute pointe sur le graphique fondamental, en produisant l'énergie de pointe avec les turbines hydrauliques, mais une telle conjugaison n'empêchera pas que, durant les heures creuses de nuit, les chaudières de la centrale thermique soient ou arrêtées ou mal utilisées.

Etant donné, d'autre part, l'extrême souplesse que l'on peut réaliser maintenant grâce aux interconnexions de centrales, par l'emploi de lignes de jumelage à haute tension, on conçoit que pour toute une région donnée d'un pays, on puisse conjuguer ensemble un certain nombre de centrales hydroélectriques et de centrales thermiques, celles-ci pouvant être d'ailleurs quelquefois, comme cela se produit en Suisse, non pas des centrales à vapeur, mais des centrales à moteur Diesel.

Toutefois, et sans préjudice du bénéfice que pourra apporter, à la station centrale thermique sa liaison électrique avec une centrale hydroélectrique, il y a bien des cas où le graphique de la station centrale thermique restera irrégulier et c'est alors qu'interviendra la nécessité de pousser les choses plus loin et de réaliser un véritable équilibrage hydraulique individuel pour chaque station centrale considérée.

(1) Ce rapport sera discuté au cours de la Semaine de discussions de novembre, le mercredi 26 novembre 1930.

Pour atteindre le but proposé, il suffira de créer, à côté de ces stations centrales, une station centrale hydroélectrique artificielle ayant son bassin de charge et son bassin de décharge propres et de faire passer successivement et judicieusement l'eau de l'un à l'autre de ces deux bassins, en adjoignant aux turbines hydrauliques de la centrale hydroélectrique artificielle, des pompes centrifuges de puissance convenable, ces pompes faisant passer l'eau du bassin inférieur au bassin supérieur pendant les heures creuses, les turbines hydrauliques renvoyant alors cette eau du bassin supérieur au bassin inférieur pendant les heures de pointe.

Cette solution, qui peut sembler paradoxale, a reçu déjà de nombreuses applications depuis une vingtaine d'années en Suisse et en Allemagne, et nous voudrions insister auprès des Exploitants des stations centrales thermiques françaises du Nord, de l'Est et du bassin parisien, pour que ces Messieurs veuillent bien imiter les Ingénieurs Suisses et Allemands et réaliser, tout comme eux, de grosses économies dans leur consommation de charbon et dans l'entretien de leurs chaudières et de leurs turbines.

Il est assez intéressant d'estimer d'une façon approchée ce que la réalisation d'un tel équilibrage peut procurer d'économies.

En admettant que cet équilibrage fasse tomber la consommation unitaire moyenne, pendant 24 h., de 0,8 kg à 0,5 kg, par exemple, et en tenant compte de l'amortissement de l'usine artificielle avec ses deux bassins, nous avons trouvé que l'économie annuelle en francs français pouvait être égale à 4 fois le nombre des kWh quotidiens utiles demandés à la station centrale thermique considérée ou si l'on considère la production annuelle de kWh, l'économie réalisée sera de l'ordre de 1,33 pour 100 des kWh annuellement produits par la station centrale.

Le schéma fondamental de l'équilibrage hydraulique tel que nous l'avons exposé serait le suivant : (fig. 1)

B et B₁ seront les bassins inférieur et supérieur, T la turbine hydraulique de décharge, P la pompe de charge et A M l'alternateur-moteur synchrone fonctionnant pendant les heures creuses en moteur et en alternateur pendant les heures de pointe.

Comme les heures de pointe sont en général beaucoup moins nombreuses que les heures creuses, la turbine du groupe d'équilibrage sera plus puissante que la pompe et c'est elle qui définira la puissance de l'alternateur-moteur synchrone.

Pour des centrales importantes, on arrive à réaliser des groupes d'équilibrage dont la pompe a une puissance de 30 000 ch et l'alternateur et la turbine une puissance de 50 000 ch.

Nous ne saurions trop inviter les Ingénieurs Français à aller visiter, dans la Saxe et dans le bassin de la Ruhr les deux installations très puissantes d'équilibrage que les Maisons Sulzer et Voith sont en train de mettre au point.

Dans la Saxe, on a réalisé deux bassins de charge et de décharge que l'on appelle Oberwartha et Niederwartha, chacun de ces deux bassins a une capacité de 2 000 000 m³ et comme ils sont placés à 150 m de dénivellation l'un de l'autre, ils permettent de récupérer plus de 600 000 kWh par jour ou 200 000 000 par an.

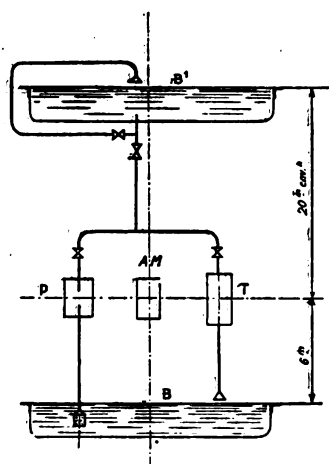


Fig. 1.

Dans le bassin de la Ruhr, on a aménagé, non loin de Herdecke et d'une colline appelée Kleff, de 150 m, un bassin de décharge de 9 000 000 m³ et un bassin de charge placé sur la colline de Kleff de 1 500 000 m³.

Le bassin de décharge sert à la fois à clarifier les eaux de la Ruhr, à alimenter des turbines hydrauliques de basse chute et, en conjonction avec le bassin de la colline de Kleff, à équilibrer pour les centrales de la Cie Rhéno-Westphalienne 500 000 kWh par jour ou 100 000 000 kWh par an.

En présence de ces deux exemples frappants, il nous semble que si l'on veut bien considérer que nos stations centrales de la Région parisienne sont admirablement placées entre la Seine et l'ensemble

des collines qui dominent Paris, il suffira d'aménager sur le haut de ces collines un ou plusieurs bassins de charge de 2 000 000 m³ et d'installer aux abords de la Seine un ou plusieurs groupes d'équilibrage de 50 000 ch pour permettre à ces stations centrales de la Région parisienne d'économiser 300 000 000 ou 400 000 000 kWh par an, tout en diminuant considérablement les frais d'entretien de leurs chaudières et de leurs turbines.

L'ensemble de ces stations centrales de la Région parisienne produisant 5 000 000 kWh par jour, nous croyons être très prudents en estimant l'économie annuelle, qui résultera pour elles de l'application de l'équilibrage hydraulique, tel que nous venons de le décrire, à une somme d'au moins 20 000 000 f par an.

B. — APPLICATION A L'INDUSTRIE MÉTALLURGIQUE ET MINIÈRE

Si nous considérons l'ensemble des centrales thermiques du Nord et de l'Est de la France, ce sont pour la plupart des centrales métallurgiques ou minières et, pour les centrales de l'Est, il est évident que l'on trouvera toujours des cours d'eau et des collines permettant l'installation facile des bassins d'équilibrage.

Dans la région du Nord de la France, on pourrait nous objecter qu'il y a peu de dénivellations et que, par conséquent, les bassins d'eau devraient avoir des capacités hors de proportion avec les kWh à récupérer.

Cependant, nous ferons remarquer que non loin de la région des canaux du Nord de la France, il y a des collines comme celles de l'Artois, ou comme celles du Mont Cassel, qui permettraient des récupérations intéressantes grâce aux lignes de jonction à haute tension qui sillonnent cette région.

Mais sans aller plus loin, nous voudrions attirer votre attention sur un fait, qui, si paradoxal qu'il puisse paraître, est cependant tout à fait exact ; c'est que c'est justement le Nord de la France qui possède les plus belles chutes d'eau de tout le Pays, grâce aux 200 et quelques puits miniers dont la surface de cette Région est perforée.

Ces 200 puits miniers constituent, en effet, autant de chutes d'eau faciles à équiper et comme ils ont en moyenne 500 mètres de profondeur, la capacité des bassins d'équilibrage à installer, à la surface du sol et au fond des puits sera relativement faible.

Nous avons calculé, en effet, que pour installer un groupe d'équi-

librage de 1 000 Ch en moyenne par puits, ce qui pour tout l'ensemble du bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais représente déjà la puissance respectable de 200 000 ch, il suffirait d'installer au fond de chaque puits un réservoir ou albraque de 4 000 à 5 000 m³.

On voit ainsi tout le bénéfice que l'on pourra retirer de cette conception, et combien simple deviendra l'équilibrage de toutes les centrales thermiques éparpillées dans le bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais, lorsque l'on se sera décidé à installer aux abords et au fond de chaque puits des réservoirs de 4 000 à 5 000 m³, les groupes d'équilibrage étant installés au fond de chaque puits.

Ces groupes d'équilibrage seront d'ailleurs fort simples puisqu'ils seront essentiellement constitués par une pompe d'environ 800 ch et une turbine hydraulique de 1 000 ch attaquant sur le même arbre un alternateur-moteur synchrone de 1 000 ch.

Notons que l'on pourrait, à la rigueur adopter une solution plus élégante en installant au fond de chaque puits une turbine hydraulique attaquant une poulie Koepe et remplaçant purement et simplement la machine d'extraction ordinairement placée à la surface.

L'eau, que la turbine hydraulique recevrait de la surface du sol pour effectuer son travail, après avoir passé dans le bassin inférieur du fond du puits serait renvoyée au jour pendant les heures de nuit par un groupe moto-pompe indépendant de la turbine.

On voit donc que, bien loin d'être plus compliqué que dans la Région parisienne, le problème de l'équilibrage pour les stations centrales minières peut se résoudre d'une manière aussi simple qu'élégante.

C. — CONCLUSION

En résumé, nous préconisons pour les grosses stations centrales thermiques d'électricité du Nord, de l'Est et de la Région parisienne, l'installation auprès de chacune d'elles ou auprès du groupement de 3 ou 4 d'entre elles, de deux bassins d'équilibrage d'une importance totale pour chaque îlot de 1 à 5 000 000 m³, les échanges entre ces deux bassins étant obtenus par des groupes d'équilibrage essentiellement constitués par une turbine hydraulique, une pompe et un alternateur-moteur synchrone calés sur le même arbre.

En réalisant de telles installations d'équilibrage, les Exploitants des stations centrales thermiques d'électricité seront assurés de récupérer chaque année des centaines de millions de kWh, c'est-à-dire des dizaines de millions de francs.

L'ÉTAT ACTUEL DU PROBLÈME DE L'INTERCONNEXION DES RÉSEAUX ⁽¹⁾

par M. J. FALLOU

Depuis quelques années, un mouvement décisif se manifeste dans le monde entier en faveur d'un regroupement général des réseaux de transport et de distribution, et les interconnexions se multiplient dans tous les pays, en dépassant même souvent leurs frontières, avec une rapidité qui démontre à elle seule l'intérêt économique considérable que chacun peut retirer de ces opérations.

Pour celui qui peut avoir le loisir d'examiner dans leurs détails quelques-unes de ces réalisations, il est particulièrement curieux de constater que dans chaque cas particulier le problème de l'interconnexion a pu se prêter à des solutions souvent radicalement différentes, et que ces solutions sont le plus généralement assez éloignées de la conception idéalement simple qui consisterait à mailler les feeders de transport et de distribution dans tous les postes où ils peuvent se rencontrer. Ceci prouve bien que là comme ailleurs une doctrine trop générale ne saurait s'appliquer, et que si la tendance mondiale est bien vers la marche en parallèle toujours plus étendue, il a fallu tenir compte dans chaque région de contingences locales et de situations de fait impossibles à modifier. Ceci prouve aussi que la mise en parallèle soulève encore certains problèmes techniques, dont un grand nombre ont heureusement reçu une solution à l'heure actuelle, mais dont certains subsistent et pèsent sur les possibilités de réalisation.

Il n'est donc peut-être pas sans intérêt de faire « le point » sur cette question encore en pleine évolution, de rappeler les arguments qui ont été présentés contre sa réalisation, et de passer en revue les principales solutions qui ont été adoptées jusqu'à ce jour.

(1) Ce rapport présenté à la 4^e Section (Présidence de M. Daguerre), dans sa séance du 30 mai 1930 sera présenté et discuté à la Semaine annuelle de discussion, le jeudi 27 novembre 1930.

I. — ARGUMENTS PRÉSENTÉS CONTRE LA RÉALISATION DES INTERCONNEXIONS

Nous rappellerons tout d'abord, sous forme d'une sorte d'inventaire, les arguments présentés contre l'interconnexion, afin de classer d'un côté ceux qui ne doivent plus être retenus parce que les progrès de la technique les ont définitivement écartés, et d'un autre côté ceux qui subsistent encore et dont il faut tenir compte dans l'élaboration des projets.

Nous ne pourrions mieux faire dans cette voie qu'en choisissant pour guide la conférence particulièrement intéressante et documentée qu'a prononcée le regretté professeur Semenza en décembre 1923 devant les membres de la Société Française des Electriciens ⁽¹⁾ ; nous en extrairons même directement les passages essentiels. Cette conférence de Semenza est un document très remarquable qui marque la date du point de départ de réalisations véritablement importantes en matière d'interconnexions, et si nous étions amenés à réfuter la plupart des objections qui s'y trouvent courageusement formulées, et qui avaient d'ailleurs leur pleine valeur à cette époque encore toute récente, ce serait non pas dans un but de critique rétrospective, mais bien plutôt pour montrer le chemin considérable qu'a pu parcourir la technique en un très petit nombre d'années.

Le rapport de Semenza divise les difficultés de réalisation de la marche en parallèle en deux catégories, les unes se rapportant au fonctionnement normal, les autres aux périodes troublées.

A) Répartition des puissances actives et réactives.

En service normal, l'interconnexion des réseaux nécessite à chaque instant une juste répartition des puissances actives et réactives entre les diverses sources de production. « La plus facile à accomplir de ces fonctions, disait Semenza, est celle de la puissance active. Il ne sera jamais difficile à un répartiteur, pourvu qu'on arrive à lui soumettre la commande de toutes les usines, d'arriver au but sans que la fréquence du système tout entier s'écarte trop des limites normales...

(1) Bulletin de la Société Française des Electriciens, janvier 1924, p. 43.

Il est particulièrement intéressant de comparer aujourd'hui ce document à tendances pessimistes au rapport nettement optimiste présenté par M. Darrieus dès 1925 à la Conférence Internationale des Grands Réseaux. L'expérience a fort heureusement donné raison aux vues optimistes de M. Darrieus qui avait d'ailleurs eu le mérite de ne cacher aucune des difficultés du problème et d'indiquer les grandes lignes de leurs solutions.

Ici, nous nous trouvons en présence de difficultés d'une nature toute particulière et non pas seulement d'ordre technique. D'abord, il est indispensable que les sociétés et entreprises diverses (dont les réseaux sont interconnectés) constituent un bureau unique pour l'exploitation générale de tous les réseaux, et comme il pourrait arriver que ces réseaux vinssent à avoir des intérêts antagonistes, il faudra que le bureau d'exploitation soit absolument indépendant. Est-ce facile à obtenir ? »

L'expérience a répondu formellement par l'affirmative à cette question. Les meilleurs exemples à citer, en ne considérant que la France, sont sans doute ceux de l'Union des Producteurs d'Electricité des Pyrénées-Occidentales (U.P.E.P.O.) et de la Sidérurgie Lorraine.

Le premier de ces groupements, fondé en 1923 ⁽¹⁾, associe neuf sociétés différentes exploitant au total 22 centrales qui fonctionnent en parallèle sur un même réseau. Les puissances à fournir par toutes les sociétés adhérentes au groupement sont réglées par un répartiteur unique sans que l'exploitation de cet ensemble complexe soulève de difficultés techniques particulières.

Les difficultés d'ordre économique ou psychologique indiquées par Semenza semblent devoir s'aplanir, dans la grande majorité des cas, car la marche en parallèle procure par elle-même à chaque société des avantages économiques si considérables qu'elle les incite à accepter volontiers la discipline que nécessite le bon fonctionnement de l'ensemble.

« Le programme de la répartition de la puissance réactive — poursuivait Semenza — plus intimement lié à celui de réglage de la tension, est plus compliqué. Si nous nous arrêtons à ne considérer que les moyens de réglage de la centrale, nous nous persuaderons bien vite que peu de systèmes d'une certaine étendue seraient, dans ces conditions, en état de fournir à leurs abonnés une tension qui ne varierait qu'entre des limites décemment admissibles... L'emploi de régulateurs de tension convenablement disposés peut éliminer l'influence des zones qui, plus éloignées des centres ou moins amplement alimentées, ont de fortes exigences de réglage... On ne saurait nier cependant qu'un système de ce genre, quand il a atteint une grande extension, ne soit, en ce qui concerne le réglage des tensions, un

(1) J. Godin. Conférence Internationale des Grands Réseaux, 1927 T. II, p. 15.

ensemble d'une délicatesse extrême, où ce qui se produit en un point peut se répercuter sur tout le reste avec les conséquences bien fâcheuses ».

Cet argument est encore, fort heureusement, de ceux que l'on peut, à l'heure actuelle, définitivement écarter.

Le développement de compensateurs synchrones qui permettent de maintenir la tension constante dans tous les nœuds d'interconnexion important, la généralisation de l'emploi des régulateurs automatiques sur tous les alternateurs, enfin la mise au point définitive des changements de prise en charge des transformateurs, ont résolu le problème ; ces moyens permettent, sans difficulté et à relativement peu de frais, de maintenir entre d'étroites limites la valeur efficace des tensions en tous les points du réseau où cela peut être nécessaire.

Notons en passant que l'on a perfectionné ces derniers temps le réglage automatique par la création de dispositifs qui annulent toute possibilité d'oscillation dans les échanges d'énergie entre stations ⁽¹⁾ ; on confie ce réglage à des appareils sur lesquels agissent non seulement la tension à régler, mais les puissances réactives circulant dans les différentes branches interconnectées. Ces dispositifs permettent de travailler avec des tensions et des courants actifs et réactifs quelconques sur les lignes d'interconnexion, et le réglage de la compensation s'effectue pour chaque tronçon de ligne dans la station correspondante, ce qui rend les différentes stations extrêmes et intermédiaires indépendantes les unes des autres.

Une seule difficulté peut survenir lorsque le réseau d'interconnexion constitue une boucle, par le fait que si les valeurs efficaces des tensions sont maintenues constantes, l'angle de phase de ces tensions n'en varie pas moins tout le long de la ligne d'interconnexion, ce qui a pour effet d'engendrer d'inutiles courants de circulation dans la boucle fermée.

Mais, pour ce problème encore, il existe une solution générale qui consiste à introduire en un point de la boucle une force électromotrice de phase convenable, sensiblement décalée de 90° par rapport à la tension normale si la réactance de la ligne est grande vis-à-vis de sa résistance. Cette force électromotrice peut être engendrée soit avec des machines tournantes suivant une disposition indiquée par M. Blondel et dont une variante particulièrement intéressante a été proposée

(1) Brevets français Siemens Schuckert n° 669.552 et 669.553.

par MM. Roth et Belfils, soit encore par des transformateurs statiques dont les primaires sont branchés en dérivation sur la ligne et les secondaires en série avec celle-ci. Ce dernier dispositif a été expérimenté tout récemment avec succès aux Etats-Unis, sur une grande boucle d'interconnexion de 375 km de long groupant cinq sociétés différentes, la puissance totale des usines atteignant un million de kilowatts ⁽¹⁾.

Les difficultés de répartition des puissances actives et réactives et de réglage de la tension, qui constituaient les premières objections formulées contre la marche en parallèle des réseaux, sont donc de celles que l'on a pu facilement résoudre.

B) Répercussion des perturbations.

Parmi les difficultés de la seconde catégorie, c'est-à-dire celles inhérentes aux régimes troublés, Semenza a particulièrement insisté sur l'aggravation des répercussions des irrégularités de service, qu'il attribuait plus spécialement à l'impossibilité d'isoler sélectivement les défauts dans un réseau comportant plusieurs sources d'énergie. Le passage suivant de sa conférence était particulièrement intéressant : « Dans un réseau isolé, à centre générateur unique, le problème de l'exclusion d'un élément endommagé, sans troubler le reste, est résolu. L'emploi judicieux d'interrupteurs automatiques, commandés par des relais de surcharge, d'énergie ou différentiels avec réglage de temps, a donné d'excellents résultats dans beaucoup d'installations... Mais dans le cas de réseaux bouclés entre eux en vue d'échanges d'énergie, ces conditions favorables s'évanouissent ; l'énergie a toute facilité pour varier de grandeur et de direction. Peut-on prétendre suivre ces mouvements au moyen d'une accommodation continue des intensités et des temps de déclenchements des relais ? »

Cette objection était peut-être, en effet, la plus importante et la plus grave qu'ait pu formuler Semenza en 1923. Le problème de la protection sélective, alors basé presque exclusivement sur l'emploi de relais temporisés, constituait certainement l'obstacle le plus sérieux à la continuité de service d'un réseau bouclé et on était en droit de le considérer comme un argument décisif en faveur de la marche

(1) W. J. Lyman, Journal of the A. I. E. E., février 1930, p. 97.

séparée des réseaux. Nous connaissons, en ce qui nous concerne, des réseaux où la mise en parallèle des usines a dû être retardée faute d'un dispositif de protection réellement sélectif.

Fort heureusement ici encore, le problème a très rapidement évolué ces dernières années, et la technique, de la protection, fondée sur des bases nouvelles, permet aujourd'hui d'envisager la question sous un tout autre jour. Le développement des relais différentiels de déséquilibre fournit une solution presque idéale dans le cas où le réseau d'interconnexion comprend plusieurs lignes qui peuvent être groupées en parallèle, et permet d'éliminer très rapidement les défauts quelles que soient la grandeur et la direction des puissances normales mises en jeu. D'autre part, on a vu naître aussi ces dernières années une nouvelle catégorie de relais dits d'impédance ou de réactance, dont la mise au point n'est peut-être pas encore définitive et qui recevront encore certainement de nombreux perfectionnements, mais qui d'ores et déjà donnent une solution très approchée du problème de la sélection dans le cas le plus difficile d'un réseau bouclé à une seule file de lignes, interconnectant un grand nombre de centrales. On peut déclarer en tous les cas, qu'à l'heure actuelle la sélection proprement dite des défauts peut être assurée dans les réseaux les plus compliqués.

Il faut admettre toutefois que si la sélectivité des déclenchements automatiques est une condition nécessaire pour assurer la continuité de service d'un réseau interconnecté, elle n'est pas encore suffisante pour annuler complètement la répercussion, sur tout l'ensemble des réseaux en parallèle, de défauts pouvant survenir dans l'un d'entre eux. Ces répercussions se traduisent par des chutes de tensions qui tendent à compromettre soit la stabilité de marche en parallèle des usines, soit même plus simplement le fonctionnement correct des moteurs alimentés. La solution complète sera trouvée le jour où l'on pourra utiliser des systèmes de protection permettant la coupure pratiquement instantanée des courts-circuits, comme on a été conduit à le faire pour des raisons un peu différentes en équipant de disjoncteurs ultra-rapides les réseaux de traction à courant continu et même à courant alternatif ⁽¹⁾. Des recherches sont effectuées actuellement, dans le but de diminuer la durée d'ouverture des interrupteurs, et de grands progrès ont été réalisés tout dernièrement de ce côté, puisqu'on est arrivé à faire passer la durée totale de coupure sur de grands dis-

(1) T. W. Mc Nairy, Journal of the A. I. E. E., octobre 1928.

joncteurs à 220 V, de 0,5 s à 0,15 s environ, y compris les retards dus aux relais et à l'inertie des mécanismes.

La recherche de systèmes de protection sélective instantanée est poursuivie parallèlement, et nous croyons que dans un avenir plus ou moins proche l'utilisation de courants à haute fréquence transmis par les lignes elles-mêmes, pourra donner la solution de ce problème difficile.

C) Aggravation des effets des courts-circuits.

Une dernière objection formulée à l'encontre de la mise en parallèle des réseaux est relative à l'aggravation des effets de court-circuit. Nous citerons encore à ce sujet le passage particulièrement suggestif de la communication de Semenza : « En général, le petit réseau a été conçu pour vivre seul, et même quand sa tension était élevée, les puissances en jeu restaient encore faibles. Ce petit réseau pouvait donc se permettre une existence paisible, se contenter de déclancheurs à huile de dimensions médiocres, de parafoudres de types primitifs, de transformateurs dont les constructeurs avaient pu ne pas songer aux effets électrodynamiques ; mais aussitôt que l'on pense à effectuer sa connexion à un réseau voisin, d'une puissance décuple de la sienne, adieu la vie tranquille : les déclancheurs explosent, les parafoudres ne coupent plus les arcs, les transformateurs se détériorent... On ne peut donc négliger le fait que la mise en parallèle des petites installations exige une immobilisation de capital bien supérieure à celle que réclamerait leur existence individuelle et, de ce fait, il faudra bien en tenir compte dans un bilan d'ensemble. »

Il est de fait que la nécessité de tenir compte des conditions d'établissement d'anciens réseaux dont il est, la plupart du temps, impossible de remanier les éléments, constitue la difficulté la plus grave qui pèse sur les possibilités d'interconnexions : elle peut varier d'ailleurs considérablement d'un réseau à un autre, suivant la nature des installations que l'on groupe en parallèle, et suivant l'importance des centrales interconnectées et la longueur des lignes qui peuvent les relier.

La solution peut être trouvée dans une certaine mesure par l'emploi judicieux de transformateurs d'interconnexion à grande réactance ou même par l'usage de bobines de réactance additionnelles ; mais l'installation de pareilles réactances qui diminuent la rigidité des liens

d'interconnexion peut, dans certains cas, soulever d'autres difficultés inhérentes à la stabilité de marche en parallèle. Il faut remarquer, en effet, que tout dispositif propre à diminuer les courants de courts-circuits ⁽¹⁾ — bobines de réactance, régulateurs d'intensité — a pour effet de diminuer les possibilités d'échange de puissance synchronisante entre les centrales. Seuls les courts-circuits à la terre sont susceptibles d'être limités sans qu'il en résulte une diminution de la rigidité des liaisons d'interconnexion, et c'est pour cette raison que nous attachons tant d'intérêt à la séparation aussi complète que possible des phases ⁽¹⁾. Mais en toute rigueur, un défaut entre phases reste toujours à redouter — par suite, par exemple, d'une double mise à la terre — et les installations doivent être réalisées de telle sorte que de pareils incidents ne dégénèrent pas en catastrophes.

II. — DIFFÉRENTS MODES D'INTERCONNEXION

Le problème de l'interconnexion est, en dernière analyse, un problème de court-circuit ; il se pose donc en pratique de manières essentiellement différentes suivant qu'il s'agit de relier entre eux,

ou bien des centrales très importantes, mais très éloignées les unes des autres (réseaux d'interconnexion à grande distance),

ou bien des centrales de moyenne importance réparties sur un vaste territoire (réseaux d'interconnexion régionaux),

ou bien les supercentrales urbaines rassemblées dans une même localité.

Cette classification est évidemment arbitraire, et il est évident, par exemple, que les réseaux urbains peuvent se trouver reliés eux-mêmes à des centres d'alimentation éloignés et ne constituer ainsi qu'un point particulier des réseaux d'interconnexion à grande distance.

Quoi qu'il en soit, il est bien certain qu'au point de vue qui nous occupe, c'est dans les réseaux urbains que se présentent les difficultés maxima, dues la plupart du temps à la concentration de puissances considérables sur une surface relativement restreinte, et en même temps, à la présence d'installations anciennes qu'il est impossible de refondre.

C'est donc à la réalisation des interconnexions dans les grands cen-

(1) Bulletin S. F. E. 1929, p. 883.

tres urbains que nous nous arrêterons maintenant plus spécialement, en prenant pour exemple les systèmes adoptés dans les nombreuses cités où la puissance installée dépasse, dès maintenant, le million de kilowatts.

A) *Interconnexion rigide par les centres.*

Un premier moyen de relier les usines entre elles est de superposer au réseau général de distribution à basse ou moyenne tension, un nouveau réseau à très haute tension qui constitue une barre générale d'interconnexion soudant entre elles rigidement toutes les stations de production.

La mise au point récente des câbles souterrains à 60 et même à 132 kV a rendu aisée l'exécution de ces super-réseaux, dont l'exemple le plus typique, à l'heure actuelle, est probablement celui de Chicago que nous nous proposons de décrire brièvement.

La ville de Chicago est desservie par deux réseaux, l'un à 60 p.s., l'autre à 25 p.s., ces deux réseaux étant d'ailleurs couplés en parallèle au moyen de groupes changeurs de fréquence de grande puissance.

Le réseau à 60 périodes dont nous nous occuperons exclusivement est alimenté par des usines thermiques dont la puissance totalisée atteignait en 1928, 983 500 kW, ces usines étant reliées par des lignes à haute tension aux réseaux voisins de l'Illinois et de l'Indiana, ce qui porte à environ 1 500 000 kW la puissance totale interconnectée.

La fig. 1 indique dans ses grandes lignes, la manière dont est réalisée l'interconnexion des usines à 60 périodes ; le nombre de machines, de départs et de liaisons s'y trouve réduit au strict minimum dans le seul but de schématiser le système. Les centrales sont reliées directement entre elles par un système de câbles à 33 et à 66 kV spécialement affecté à la synchronisation générale et aux échanges d'énergie. Du côté des câbles monopolaires à 66 kV, la limitation des courants de court-circuit est obtenue, d'une part, par l'insertion de résistances de 30 ohms entre les points neutres et la terre, et, d'autre part, en sectionnant les barres à 66 kV des postes de telle sorte que l'impédance de chaque câble soit augmentée de celle des transformateurs d'alimentation, la mise en parallèle n'étant réalisée qu'au secondaire (12 kV) de ces transformateurs. Par ailleurs, la mise à la terre du neutre à travers les résistances de 30 ohms n'est effectuée qu'en deux ou au plus trois points dans chaque file de câbles, et les tableaux à

66 kV sont construits en respectant une séparation complète des phases.

Les jonctions de câbles à 33 kV sont traitées d'une manière analogue: chaque câble est inséré entre un transformateur élévateur 12/33 kV, et un transformateur abaisseur 33/12 kV ; de plus chacun de ces transformateurs élévateurs ou abaisseurs n'est relié aux barres à 12 kV que par l'intermédiaire d'une bobine de réactance.

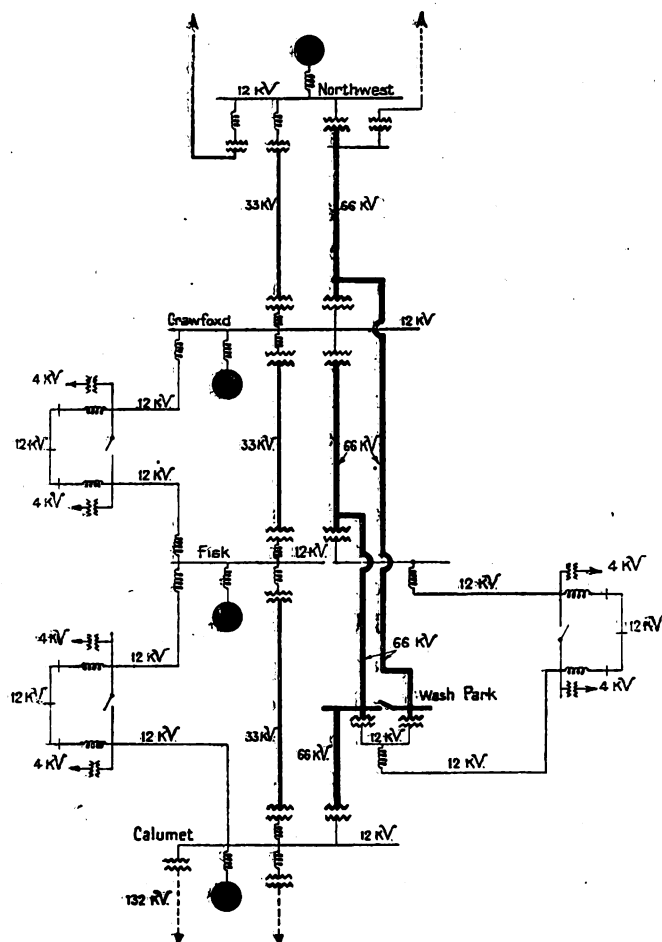


Fig. 1.

C'est sur les barres à 12 kV des usines, sur lesquelles se trouvent branchés à la fois tous les alternateurs et toutes les lignes d'interconnexion, que l'importance des courants de court-circuit éventuels devient la plus considérable. La limitation de ces courants de court-circuit est alors réalisée, d'une part par une séparation complète des

phases dans les tableaux, d'autre part par l'interposition entre le point neutre des machines et la masse, de résistances limitant à quelques milliers d'ampères le courant de court-circuit entre phase et terre. Enfin tous les feeders à 12 kV issus de ces tableaux sont munis de réactances de 0,5 ohms. Dans les sous-stations de distribution, les feeders d'alimentation à 12 kV issus de centrales différentes parviennent sur deux jeux de barres normalement sectionnés, mais qui se trouvent reliés entre eux par des câbles de distribution munis eux-mêmes à leur origine de réactances de l'ordre de 1 ohm. Ajoutons enfin que le réseau à 66 kV se trouve bouclé lui-même par un système à 132 kV qui contourne la ville à grande distance ; une partie de ce dernier système est constituée par des câbles souterrains.

Grâce à la séparation des phases dans tous les postes de première importance, et à l'installation de bobines de réactances sur tous les feeders à moyenne tension, la Commonwealth Edison Co qui exploite ce réseau a pu ainsi réaliser une interconnexion rigide de ses centres de production tout en gardant une sécurité d'exploitation tout à fait remarquable. La possibilité de transporter de grandes quantités d'énergie par les feeders d'interconnexion permet de réduire au minimum le nombre d'unités génératrices en ordre de marche, et d'exploiter toutes les usines comme une centrale unique et par conséquent dans des conditions optima d'économie.

B) *Interconnexion par liaisons flexibles.*

Un mode d'interconnexion radicalement différent du précédent est celui qui est réalisé dans la ville de Détroit où la puissance installée, répartie dans quatre usines thermiques, atteint un million de kilowatts.

Nous ne décrirons pas en détail les dispositions de ce réseau qui ont fait l'objet d'une récente et très complète publication ⁽¹⁾, et nous en indiquerons seulement la disposition générale.

L'idée maîtresse qui a conduit à sa réalisation est la suivante :

Les centres de distributions sont divisés en zones distinctes, alimentées chacune par une centrale ou un groupe de centrales, ou encore par une grande sous-station. Chaque zone est considérée comme un réseau autonome produisant et distribuant la puissance qui lui est nécessaire ; on y maintient d'ailleurs en ordre de marche les rechan-

(1) S. M. Dean, Journal of the A. I. E. E., mars 1930.

ges que nécessiterait l'arrêt fortuit d'une unité. Les différentes zones sont ensuite interconnectées par des lignes spéciales dont la capacité de transport est élevée, et qui peuvent permettre des échanges de puissances importants, mais qui sont munis de relais très rapides destinés à les mettre hors service dès qu'un incident survient dans une des zones interconnectées.

Une autre particularité de ce système réside dans l'emploi des bobines de réactances : La Detroit Edison C^o a estimé que l'on doit éviter aussi longtemps que possible l'installation de réactances aux départs des feeders et elle les a multipliés au contraire dans les liens d'interconnexion.

Ce procédé d'interconnexion a donc pour but principal de localiser immédiatement une perturbation dans la zone où elle s'est produite, en séparant automatiquement cette zone de ses voisines, et d'éviter ainsi la probabilité d'une panne générale du réseau.

On lui a toutefois reproché, d'une part, d'augmenter la possibilité d'interruption dans chaque zone, et, d'autre part, de ne pas permettre de tirer tous les avantages de sécurité et d'économie que pourraient provoquer la diversité et la multiplicité des sources de production.

C) Synchronisation par le réseau de distribution.

Un troisième mode d'interconnexion, tout à fait différent des deux autres et particulièrement original, est utilisé pour le réseau à 60 p.s. de New-York actuellement en cours de réorganisation par suite de la fusion récente de diverses sociétés.

Le principe adopté consiste à synchroniser les usines ou fractions d'usines, non pas sur une barre commune à haute tension, mais au contraire sur les mailles des réseaux à basse tension servant à la distribution. Ce dispositif de « synchronisation par la charge », dû à A.-H. Kehoe, est schématisé dans ses grandes lignes par la fig. 2. Deux centrales ou sections de centrales A et B sont reliées entre elles à travers les transformateurs T_1 et T_2 qui alimentent une même distribution à basse tension D. Ces réseaux à basse tension sont en principe constitués par une série de mailles serrées à 120-208 V alimentant chacune une surface d'environ 500 ha, et sont réalisées au moyen de câbles monopolaires de 100 mm². Chaque maille est alimentée par un transformateur dont la puissance est comprise entre 150 et 500 kVA.

Le schéma de la fig. 3 indique plus exactement la réalisation matérielle de cette interconnexion : on y voit que l'usine de Sherman Creek est divisée en trois sections, et l'usine de Hell-Gate en quatre sections. L'installation des mailles de distribution à basse tension n'étant réalisée que dans une relativement petite partie de la ville de New-York, la mise en parallèle des différentes sections d'usines est réalisée par les barres à basse tension (3 ou 4 kV) des sous-stations de distribution. Par exemple, les barres à 2,3 kV de la sous-station de

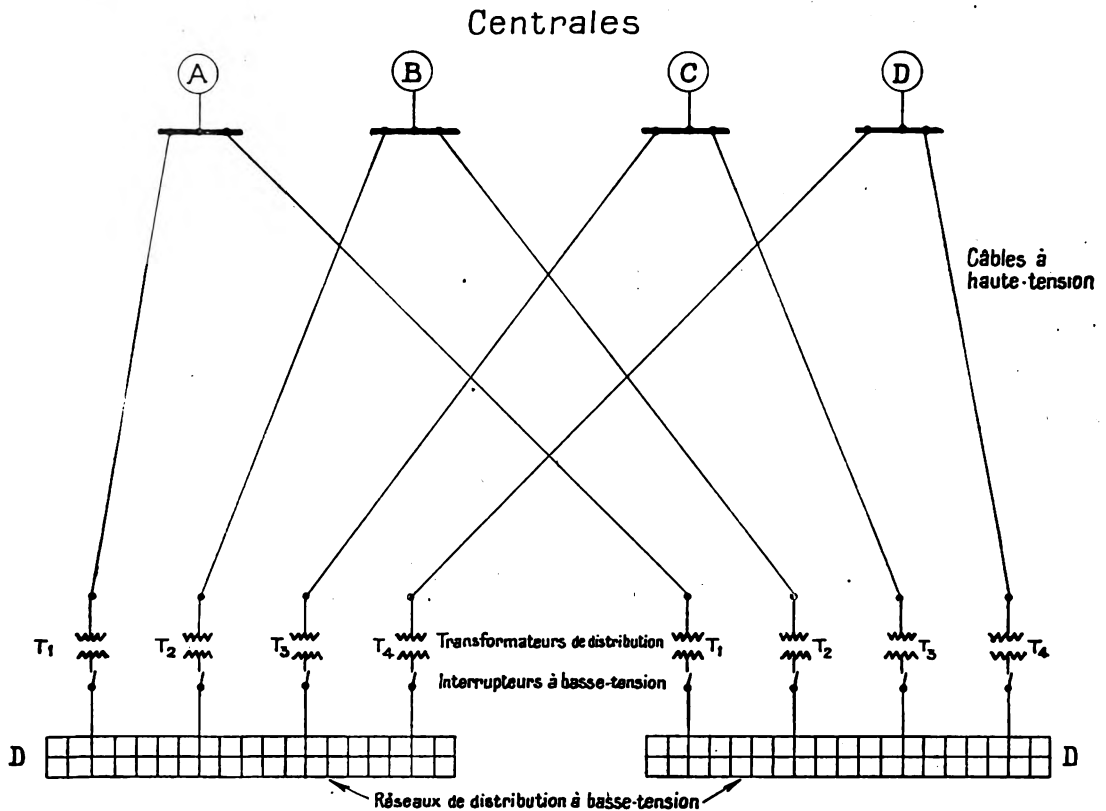


Fig. 2.

la 188^e rue de Bronx sont alimentées par quatre transformateurs reliés eux-mêmes respectivement aux sections Sud-Ouest de Sherman Creek, et aux sections 4, 5, 6 et 7 de Hell Gate.

Les protagonistes de cette nouvelle disposition invoquent à son actif les avantages suivants :

1^o Haute sécurité d'exploitation, les diverses sources de puissance n'étant pas affectées simultanément par les défauts qui peuvent se pro-

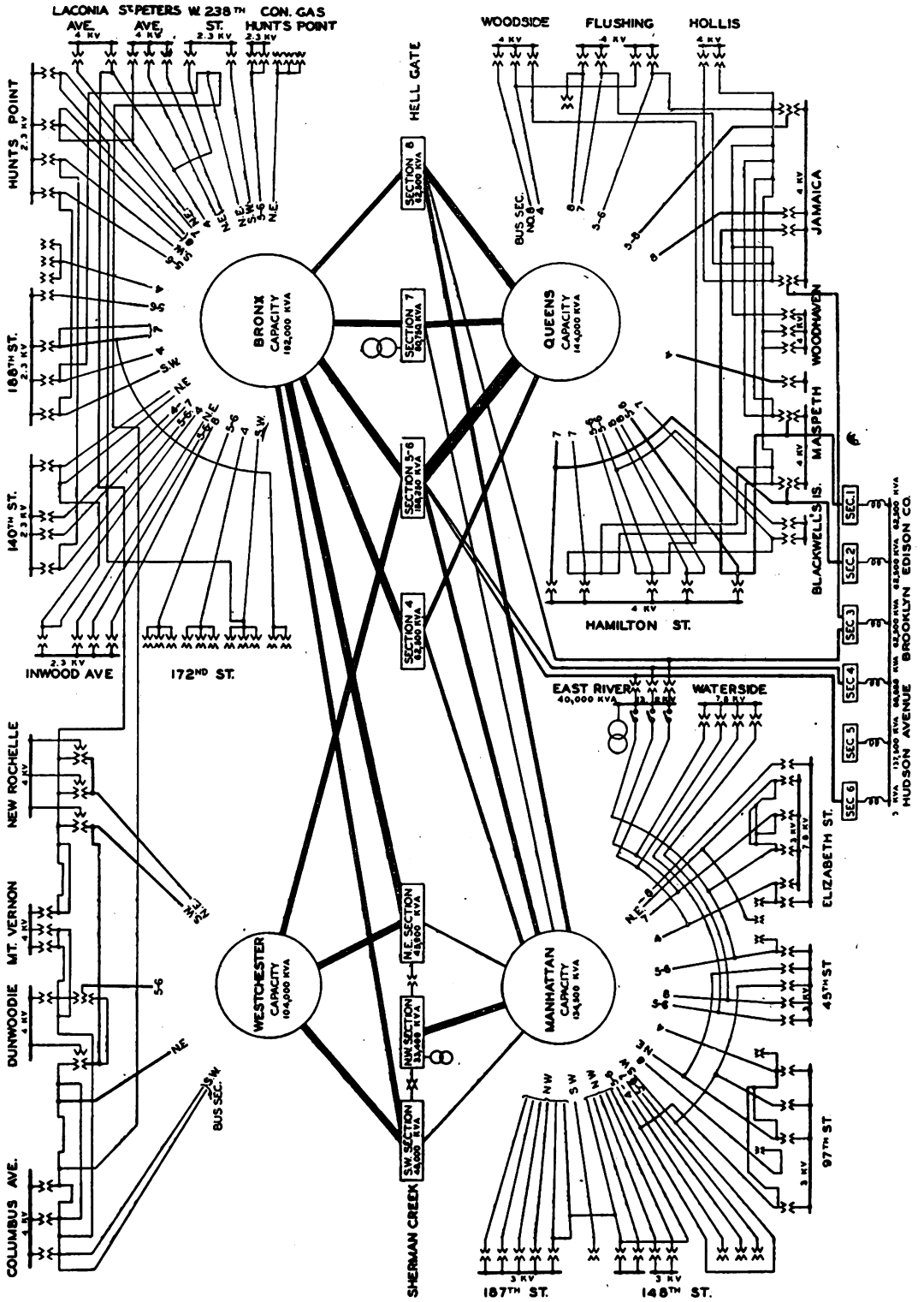


Fig. 2.

duire en un point quelconque du réseau général, et chaque sous-station de distribution recevant son énergie de plusieurs sources différentes ;

2° Réduction des courants de court-circuit à des valeurs relativement modérées grâce, d'une part, au sectionnement des centrales et, d'autre part, à la réactance élevée du nœud d'interconnexion que constitue chaque centre de distribution ;

3° Possibilité d'extension quasi indéfinie du système, à condition de maintenir la même puissance d'alternateurs sur les anciens réseaux de distribution ;

4° Réalisation particulièrement aisée de la protection instantanée des feeders à haute tension répartis radialement autour de chaque section d'usine ;

5° Facilité de réglage des échanges de puissances actives et réactives ;

6° Facilité de réglage de la tension sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à des régulateurs d'induction ou à des appareils similaires ;

7° Réduction des perturbations et limitation de leur étendue en cas d'incident en un point du réseau.

La seule question importante, qui pouvait prêter à critique, est celle de la stabilité de marche en parallèle des diverses sections d'usines ainsi séparées par l'impédance élevée des réseaux de distribution : des expériences réalisées sur ce réseau ont complètement apaisé cette préoccupation.

D) *Interconnexion en gradin.*

Nous décrirons, pour terminer, le schéma général d'interconnexion qui a été adopté pour la région parisienne. On sait que depuis 1929, les trois groupes de sociétés productrices de la région parisienne ont mis à l'étude une nouvelle concentration de la production, et sont parvenues à un accord en vue de l'interconnexion générale de leurs usines.

Le bloc d'usines thermiques réparties autour de Paris, représente d'ores et déjà plus de 1 250 000 kW installés, auxquels s'ajoutent les 75 000 kW d'Eguzon et de Coindre. A cette puissance existante s'ajoutera bientôt l'appoint de nouvelles usines thermiques de base (Vitry-Sud et Saint-Denis), et celui d'une seconde tranche très importante d'usines hydrauliques du Massif Central ; deux lignes à 220 kV, dont une est partiellement construite relieront prochainement

le poste de Chevilly, nœud des réseaux souterrains à 60 kV, aux usines de Brommat sur la Truyère, de Marèges sur la Dordogne, et à celles de la Cère

Pour réaliser l'interconnexion de toutes ces centrales, la solution qui nous a paru s'adapter le mieux aux circonstances locales dont nous avons à tenir compte est celle que l'on peut appeler l'interconnexion « en gradin », ou la synchronisation progressive vers la plus haute tension de service, à laquelle on est conduit par les considérations suivantes :

1° Soit parce que les installations à basse tension comportent du matériel plus ancien, soit parce que même avec des appareils modernes les nécessités de construction l'exigent, il est de fait que les interrupteurs fonctionnent d'autant mieux qu'ils sont établis pour une tension de service plus élevée. La plus grande difficulté rencontrée dans les réseaux du monde entier, croyons-nous, se présente pour les interrupteurs fonctionnant sur des réseaux de 10 à 15 kV.

A la tension de 60 kV, les difficultés sont déjà moindres, et, en fait, les appareils installés depuis bientôt dix ans sur le réseau de l'Union d'Electricité ont fait leur preuve en dépit de conditions de service parfois très dures. Enfin à la tension de 220 kV, des pouvoirs de rupture dépassant 5 000 A sont faciles à obtenir, surtout avec les appareils les plus modernes.

2° Dans un réseau tel que celui de la région parisienne, l'interconnexion des usines thermiques a surtout pour but de permettre d'effectuer à chaque instant des reports de puissance d'une usine sur l'autre : il importe donc avant tout, pour éviter toute coupure à la clientèle, que les usines soient synchronisées, mais il n'est pas nécessaire de disposer entre ces usines un lien synchronisant absolument rigide ; il est possible d'intercaler entre ces usines des réactances suffisamment dimensionnées pour limiter l'amplitude des courts-circuits et la répercussion des incidents d'une portion de réseau sur les portions voisines, ces réactances étant néanmoins suffisamment faibles pour qu'elles ne compromettent pas la stabilité de marche en parallèle.

3° Pour assurer le fonctionnement stable des longues lignes à 220 kV au maximum de leur capacité de transport, et pour permettre aux usines thermiques de fournir ou d'absorber une partie de la puissance réactive nécessaire à leur régulation, il convient, au contraire,

d'assurer un lien aussi rigide que possible entre les usines hydrauliques et les usines thermiques fonctionnant en parallèle.

4° Les bobines de réactance constituant une sujétion importante tant par leur prix de revient élevé que par leurs difficultés d'installation, il est souhaitable de ne les utiliser qu'en dernier ressort, et

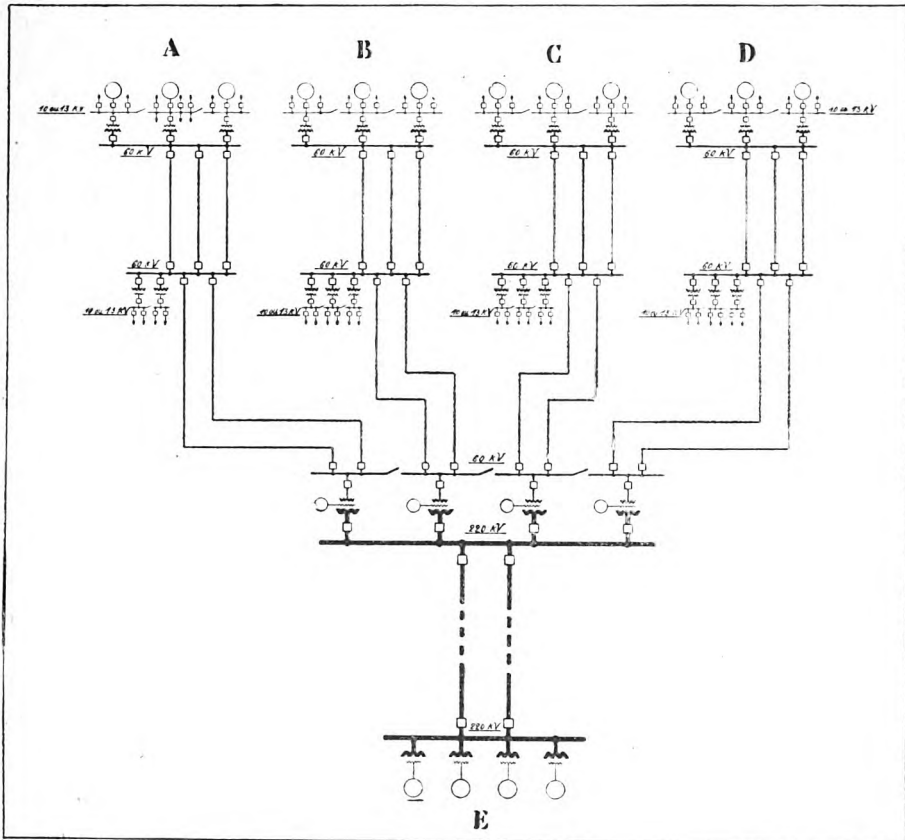


Fig. 4. — Schéma de principe de l'interconnexion « en gradin »
 A. B. C. D. — Groupe d'usines thermiques. E. — Groupe d'usines hydrauliques.

de profiter autant que faire se peut des réactances propres des machines, des transformateurs et des lignes.

Le schéma général de principe adopté est alors celui que représente la figure 4.

a) Dans chaque usine, les barres à 10 ou 13 kV (tension des alternateurs) sont normalement sectionnées en un certain nombre de tranches comprenant chacune une ou plusieurs machines, et un certain nombre de départs de feeders. Ces différentes tranches sont reliées

en parallèle par l'intermédiaire des transformateurs élévateurs, sur les barres à 60 000 V du poste situé à proximité de l'usine. La subdivision des barres à 13 kV est déterminée de telle sorte que, compte tenue de la réactance des machines directement connectés à ces barres et de celle des transformateurs, le courant de court-circuit dans le réseau à basse tension au voisinage de l'usine ne dépasse jamais le pouvoir de coupure des interrupteurs installés. Dans plusieurs usines qui n'alimentent aucun départ à la tension des alternateurs (Gennevilliers, Vitry-Sud), cette subdivision se trouve réalisée d'elle-même.

b) Les sections d'usines ainsi connectées sur les barres à 60 kV débitent ainsi sur le réseau de câbles souterrains qui alimente les principales sous-stations de distribution. Dans ces sous-stations, les barres à basse tension subissent une subdivision semblable à celle des usines, de telle sorte que les courants de courts-circuits soient limités par la seule réactance des transformateurs, à une valeur déterminée à l'avance et dépendant dans chaque cas particulier du type d'interrupteur installé.

c) L'amplitude des courants de court-circuit deviendrait dangereuse tant pour les câbles que pour les interrupteurs à 60 kV si la totalité des usines ou fraction d'usines était reliée directement en parallèle par ce réseau dont l'impédance est très faible ; d'autre part, le moindre incident survenu dans ce réseau se répercuterait avec le même degré de gravité sur tout l'ensemble du système, ce qui n'est pas désirable. Le réseau à 60 kV est donc lui-même divisé en quatre parties, interconnectant chacune un groupe de centrales ou de tranches de centrales d'une puissance totale d'environ 300 000 kW ; enfin ces quatre réseaux à 60 kV sont mis en parallèle, mais sur les barres à 220 kV du poste d'arrivée des usines hydrauliques, et par conséquent par l'intermédiaire de la réactance des 4 transformateurs 60/220 kV de 75 000 kVA chacun installés dans ce poste.

L'examen du schéma montre que l'on réussit de la sorte à réduire autant que faire se peut la réactance séparant les usines hydrauliques des usines thermiques, et à limiter simultanément le travail demandé aux interrupteurs à une valeur d'autant plus basse que la tension de service est elle-même moins élevée.

Notons toutefois que la réalisation matérielle de ce schéma nécessite, au moins provisoirement, une modification qui n'en change d'ailleurs pas le principe. Comme la première étape de travaux ne comporte que l'installation de deux transformateurs à 220 kV, on

installe dès maintenant au poste de Villejuif, voisin de Chevilly, une barre de couplage général à 60 kV et quatre bobines de réactance de 3 ohms chacune, capables d'une puissance traversante de 80 000 kVA. En première étape, ces réactances se substitueront aux transformateurs à 220 kV, et c'est sur cette barre de couplage que s'effectuera provisoirement, dès la fin des travaux en cours, la mise en parallèle de l'ensemble des usines.

CONCLUSION

Après inventaire des difficultés signalées à propos de la mise en parallèle, nous pouvons conclure qu'à l'heure actuelle le seul obstacle qui puisse encore s'opposer à un bouclage général des usines et des réseaux est l'accroissement exagéré des courants de court-circuit pouvant endommager les installations existantes.

Le problème de l'interconnexion est donc un problème de court-circuit et de stabilité : sa solution dans chaque cas particulier doit être un compromis entre les conditions imposées, d'une part, par la limitation des courants de court-circuit, et, d'autre part, par le maintien en toutes circonstances de la marche synchrone.

C'est donc dans les agglomérations urbaines, où la densité de puissance interconnectée devient considérable, que l'interconnexion des usines pose le problème le plus difficile.

Mais les quatre exemples que nous avons indiqués, où les puissances concentrées sur une petite superficie dépassent largement le million de kilowatts, montrent qu'il est toujours possible de trouver une solution de ce problème en choisissant dans chaque cas particulier le schéma le mieux adapté aux situations de fait et aux circonstances locales particulières.

Discussion

Lors de la présentation en séance de Section les observations suivantes ont été présentées :

M. DAGUERRE demande si la synchronisation par le réseau de distribution a été utilisée autre part qu'à New-York.

M. FALLOU répond qu'il ne connaît pas d'autre exemple de telles conditions de fonctionnement. Il fait remarquer à ce sujet que ces

conditions se prêteraient mal à la liaison du réseau avec une ligne de transport fournissant un appoint massif de puissance.

M. PARODI critique le terme de « flexible » utilisé pour caractériser l'interconnexion par zones s'éliminant instantanément en cas de défaut. M. Fallou convient du fait que cette appellation est impropre, c'est une traduction littérale du terme anglais utilisé par les Américains ; il y aurait lieu de rechercher un terme plus exact.

M. PARODI demande si des interrupteurs dont le temps de déclenchement est de l'ordre de 0,15 s sont actuellement en service. M. Fallou répond que des temps de déclenchement de cet ordre ont été obtenus en cours d'essais. Actuellement, il faut compter en moyenne 0,5 s pour le temps de coupure du disjoncteur ; sur le réseau U.D.E. on peut actuellement éliminer un défaut en 0,7 s comprenant le temps de fonctionnement des relais de protection et le temps d'ouverture de l'interrupteur.

M. PARODI fait ensuite remarquer qu'à l'époque où l'interconnexion était encore considérée en Europe comme présentant des difficultés considérables, elle était déjà réalisée aux Etats-Unis entre certains réseaux.

M. BENOIT demande si les réactances actuellement prévues sur les divers réseaux sont des réactances fixes ou des réactances variables.

M. FALLOU répond que jusqu'à présent, on n'a utilisé que des réactances fixes. La réalisation de ces réactances est déjà très difficile et l'adjonction de prises supplémentaires compliquerait encore le problème sans grand profit, car la valeur de réactance n'a pas à être ajustée avec précision.

TENDANCES ACTUELLES DANS L'ÉTUDE DES RADIO-RÉCEPTEURS COMMERCIAUX ⁽¹⁾

par M. E. M. DELORAINÉ

Directeur aux Laboratoires Standard.

Un système de liaison par T.S.F. peut être divisé en 3 parties essentielles :

1° Le poste émetteur et son antenne produisant et rayonnant le signal à haute fréquence.

2° Le chemin suivant lequel s'effectue la propagation.

3° L'antenne et les appareils de réception.

L'ingénieur radio-électricien doit prévoir les appareils de manière à pouvoir assurer le service au prix minimum.

La station réceptrice est généralement influencée par des parasites d'ordre statique ou industriel ou par des signaux provenant d'autres stations émettrices, et le signal incident doit avoir une intensité suffisante pour posséder une prépondérance marquée sur les précédents.

L'antenne et le poste récepteur sont étudiés de manière à réduire ces interférences autant que faire se peut, et de manière telle, que la valeur absolue du signal compatible avec la nature du service exigé, dépende essentiellement de la nature de ce système récepteur.

On obtient le rendement maximum d'un circuit récepteur quand le champ créé par un signal qui doit couvrir les bruits parasites, est réalisé avec le minimum de puissance à l'émission. Tout le problème de la réception consiste alors à prévoir des appareils qui puissent sélectionner le signal et atténuer autant que possible toutes les autres fréquences.

Moindre est l'interférence, plus faible peut être l'intensité du signal, compatible avec un service satisfaisant ; l'amplification à la réception doit donc être élevée et la puissance à l'émission aussi réduite que possible.

Historique

Avant l'apparition des tubes à vide, la portée des postes émetteurs était limitée par la difficulté de produire des signaux d'intensité suffisants pour être perçus dans un téléphone.

(1) Ce rapport sera discuté à la Semaine de novembre, le samedi 29 novembre 1930.

Pour les communications à grande distance, il était nécessaire de réaliser des antennes de réception énormes et onéreuses, dans le but de collecter le maximum possible d'énergie.

La méthode la plus évidente permettant d'améliorer le rapport signal-parasite, consistait alors à accroître la puissance à l'émission, et on vit apparaître des postes de radiotélégraphie de plusieurs centaines de kilowatts.

L'invention des tubes à vide permit d'amplifier les signaux les plus faibles au niveau voulu ; on n'était donc plus limité que par les parasites atmosphériques et par les interférences dues aux autres stations, si bien qu'en matière de radiocommunications à grande distance, l'équilibre économique entre l'émission et la réception se trouvait ainsi renversé.

Les grandes et coûteuses antennes de réception devenaient inutiles du fait de la possibilité de recueillir sur une antenne de petites dimensions des signaux susceptibles d'être amplifiés dans de larges limites.

L'appareillage de réception coûtait donc beaucoup moins. L'équilibre économique entre l'émission et la réception n'a pas encore pu être réalisé. Cet équilibre économique n'est d'ailleurs pas nécessairement un but à atteindre.

Tant qu'on n'a pas obtenu un service satisfaisant la déficience de cet équilibre, crée en fait une indication qui trace la voie à suivre en matière d'améliorations.

Grandes Ondes

On entend par grandes ondes celles qui correspondent à des fréquences inférieures à 100 kylocycles, c'est-à-dire supérieures à 3.000 mètres.

Le problème essentiel de la réception de ces ondes consiste à réduire les interférences atmosphériques. Le niveau de celles-ci détermine l'intensité du signal permettant d'obtenir un service satisfaisant et fixe également la puissance du poste d'émission. A la réception toute amélioration du rapport signal-parasite conduit à une diminution de puissance à l'émission.

Les inventeurs ont toujours rêvé de supprimer les atmosphériques; leur élimination totale, par l'adjonction d'un dispositif approprié

dans le récepteur, n'est malheureusement pas possible, mais, au cours de ces dernières années, on a pu constater une réduction considérable des effets nuisibles des atmosphériques sur grandes ondes.

Cette amélioration dérive de 3 principes essentiels : Réception directive, choix de l'emplacement de la station réceptrice et maximum de sélectivité du récepteur. Le circuit de radiotéléphonie transatlantique est un excellent exemple de ce qui peut être réalisé en la matière ; le système récepteur actuel réduit de 500 fois la puissance des atmosphériques, par rapport aux premiers essais de 1923. Comment a-t-on procédé ? On a tout d'abord utilisé des antennes de réception directives. Ces antennes étaient du type étudié par la Radio Corporation of America et connu sous le nom d'antenne Beverage. Une telle antenne possède d'excellentes propriétés réceptrices, dans un angle très faible, dont la direction générale est celle de la station émettrice ; elle ne reçoit que peu ou pas de signaux provenant d'autres directions.

Ce système réduit considérablement les atmosphériques dans toutes les directions, sauf une. On utilise actuellement un groupe de telles antennes, qui permet de réaliser un ensemble extrêmement directif et qui correspond d'ailleurs à amplifier 100 fois la puissance du poste émetteur.

Une autre amélioration a été obtenue par le choix de l'emplacement le plus favorable de la station de réception.

Des mesures exigeant beaucoup d'attention, effectuées pendant plusieurs mois, ont montré que les interférences atmosphériques décroissent à mesure qu'on progresse vers le Nord. La station de réception d'Europe fut donc installée en Ecosse, à environ 400 milles au nord de Londres. Cette situation par rapport à Londres, correspondait à accroître 50 fois la puissance d'émission. Une troisième amélioration a été obtenue en étudiant le récepteur de telle manière qu'il ne laisse passer que la bande de fréquences nécessaires à la téléphonie et atténue autant que possible toutes les fréquences extérieures à la bande à recevoir.

La tendance actuelle dans la construction des récepteurs pour grandes ondes, consiste à les rendre de plus en plus sélectifs et à les réaliser de telle manière qu'ils puissent être mis entre les mains d'opérateurs non spécialisés. Les récepteurs modernes sont en principe montés sur des panneaux métalliques, fixés sur des baies verti-

cales, semblables aux équipements de répéteurs ou de courants porteurs.

Un certain nombre de récepteurs sont généralement installés dans un bâtiment comportant une antenne simple. Si les signaux proviennent de différentes directions il y a lieu d'utiliser une antenne complexe et les signaux atteignent la station de réception par l'intermédiaire de lignes de transmission. Il peut être quelquefois nécessaire de connecter le récepteur à un bureau central par des lignes téléphoniques et télégraphiques, la totalité des messages étant effectivement reçue au bureau central et la station réceptrice travaillant simplement comme une station de répéteurs.

Ondes courtes (10 à 100 mètres).

La propagation facile des ondes radioélectriques correspondant à des fréquences comprises entre 30 et 3 mégacycles, a conduit au cours de ces dernières années, à une augmentation considérable du nombre des stations travaillant dans cette échelle de fréquences. Une unité de rayonnement de 50 000 mètres-ampères a été choisie pour le service de liaison transatlantique sur une longueur d'onde de 16 mètres. Du fait des excellentes conditions de propagation des ondes courtes, l'unité de rayonnement a dû être complètement changée. Dans ce cas, en effet, la résistance de rayonnement variant en sens inverse de la longueur d'onde, l'unité de rayonnement correspond à un faible pourcentage de la longueur d'onde. Les problèmes de réception en ondes courtes et en ondes longues sont donc entièrement différents. En grandes ondes, le problème essentiel consiste à réduire les parasites atmosphériques ; en ondes courtes le niveau de ces parasites est en principe relativement bas. En grandes ondes, le signal incident subit continuellement de légères variations quotidiennes ; en ondes courtes, il est extrêmement variable, son amplitude se modifiant considérablement en l'espace de quelques minutes ou même de quelques secondes. Ce caractère extrêmement instable des signaux, en ondes courtes constitue probablement l'un des problèmes capitaux de leur réception.

Un désavantage des ondes courtes consiste en ce fait qu'il est nécessaire d'employer des longueurs d'ondes différentes pour les transmissions diurnes et nocturnes. Si donc on se trouve dans l'obligation

d'assurer quotidiennement 24 heures de service, il est usuel de faire usage de plusieurs longueurs d'ondes.

Pour les grandes ondes, nous avons vu que les antennes directives de réception constituaient un gros perfectionnement. De telles antennes ont généralement des dimensions qui sont de l'ordre de la longueur d'onde à recevoir, elles sont de dimensions considérables et très coûteuses, mais malgré ces désavantages, on a actuellement tendance à les utiliser.

Un cadre, la combinaison d'un cadre et d'une antenne verticale, et l'antenne Beverage sont actuellement les systèmes les plus communément utilisés. En ondes courtes, il est relativement facile de réaliser à bon marché des antennes extrêmement directives. Avec une telle antenne, la réception est généralement excellent sur une seule longueur d'onde, de telle sorte que si l'on doit utiliser 2 ou 3 longueurs d'ondes, il est nécessaire de disposer de plusieurs antennes.

Etudions maintenant le récepteur proprement dit. Le niveau extrêmement bas des parasites atmosphériques en ondes courtes conduit à penser qu'il est possible d'assurer un service satisfaisant avec des champs de réception très faibles, ce qui signifie que le récepteur devra fournir une amplification très élevée. Il est possible d'obtenir de la téléphonie commerciale avec des intensités de champ de 1 microvolt par mètre et avec une antenne consistant en un fil vibrant en $1/2$ onde. Un service télégraphique peut être assuré avec des champs beaucoup plus faibles. L'accroissement considérable du nombre de stations travaillant sur des longueurs d'ondes inférieures à 100 m a conduit à augmenter parallèlement les conditions de sélectivité des récepteurs pour ondes courtes. Comme il est difficile d'obtenir à ces fréquences une grande sélectivité et une amplification élevée, ces récepteurs utilisent généralement le superhétérodyne à double détection, l'amplification et la sélectivité étant obtenues pour la moyenne fréquence la plus basse possible. Pour la téléphonie, le fading peut être compensé dans une certaine mesure par l'utilisation d'un régulateur automatique. Ce dispositif contrôle l'amplification du récepteur conformément à l'intensité du signal reçu. En télégraphie on utilise généralement d'autres dispositifs de contrôle. On a constaté que, si on reçoit simultanément un signal en ondes courtes en des points différents espacés de quelques centaines de mètres, la caractéristique de fading est différente en chaque point.

Le problème du fading peut être traité d'une autre façon consistant

à recevoir le signal simultanément en deux ou plusieurs points et à combiner les énergies dans des conditions de phase appropriées, pour exciter un récepteur commun.

Un récepteur moderne pour ondes courtes est habituellement du type superhétérodyne, dont l'amplification en volts est d'environ 100 000. La lampe à grille écran permet d'amplifier facilement à la fréquence du signal, mais on a l'habitude de localiser la totalité de l'amplification dans l'étage moyenne fréquence. La sélectivité est obtenue au moyen de filtres passe-bande, dans la moyenne fréquence, et de plusieurs circuits couplés, accordés à la fréquence du signal. Quand on étudie un superhétérodyne, il est évidemment nécessaire de prendre des dispositions pour que le second battement soit effectivement supprimé avant d'atteindre le premier étage de détection.

Pour la réception en téléphonie, on a prévu un dispositif de contrôle automatique de gain, et pour la télégraphie un dispositif de limitation maintient le signal à un niveau constant. Une sélectivité élevée en moyenne fréquence implique l'utilisation d'une fréquence hétérodyne extrêmement stable dont la variation ne doit pas être supérieure à $1/20\,000$ pour une variation de tension de 5 pour 100 dans la batterie.

L'utilisation de postes émetteurs contrôlés par quartz a rendu possible l'emploi de filtres moyenne fréquence à bande étroite. Ces filtres doivent être étudiés de telle manière que leur courbe en fonction de la fréquence ne varie pas dans le temps, ce qui signifie que leurs selfs et leurs capacités doivent rester parfaitement constantes. Le montage des postes récepteurs commerciaux pour ondes courtes, dérive de la pratique des grandes ondes et consiste à utiliser des panneaux montés sur des baies verticales. Du fait du gain élevé réalisé dans le récepteur, il y a lieu de blinder soigneusement. Les différents éléments constituant le récepteur sont généralement montés dans les boîtes métalliques séparées et fixées sur les panneaux.

Le type de montage en panneaux séparés sur baies, permet l'accessibilité facile de tous les organes, ainsi que leur remplacement. La mise en marche et le réglage sont faciles, le nombre d'accords peut être réduit au minimum le temps nécessaire pour changer la longueur d'onde n'est pas supérieur à quelques minutes.

Nous venons de considérer le problème de liaison entre stations fixes soit sur ondes courtes soit sur grandes ondes. Etudions maintenant la question de réception sur les navires et les avions.

Dans ce cas, les récepteurs sont nécessairement différents des précédents. Il existe des conditions spéciales qui conduisent à l'utilisation d'antennes de réception fortement directives, et, dans le cas de l'avion, à l'emploi de récepteurs extrêmement légers. Les interférences généralement rencontrées appartiennent essentiellement à la classe de celles produites par les moteurs électriques et, dans le cas de l'avion, le bruit consécutif à l'allumage est particulièrement gênant. Les récepteurs doivent être solidement construits et susceptibles de résister à des vibrations continuelles. De récentes expériences en ondes courtes à bord des navires ont mis en évidence la nécessité de blinder soigneusement les récepteurs pour les protéger de l'influence des moteurs des ventilateurs.

Les récepteurs commerciaux pour ondes courtes destinées aux navires ont été récemment développés ; ils sont semblables aux récepteurs de stations fixes, en ce sens qu'ils utilisent le principe superhétérodyne ; ils sont susceptibles de fournir une grande amplification et une grande sélectivité. A bord des navires, les récepteurs consistaient auparavant en un certain nombre de coffrets fixés à une table, de telle manière que l'opérateur dispose de toutes les commandes placées devant lui, et qu'il puisse simultanément lire les signaux et régler le récepteur. Un tel dispositif est très satisfaisant pour la réception des signaux télégraphiques. Un navire travaillant avec les stations terrestres et avec d'autres navires, doit continuellement changer sa longueur d'onde et chercher les appels sur une bande extrêmement large ; toutefois, en téléphonie un réglage continu du récepteur est contre indiqué. On change la longueur d'onde à certaines heures prévues et il n'y a pratiquement pas d'autres réglages à faire.

La tendance actuelle consiste donc à utiliser des baies pour la réception en téléphonie et à adopter le montage en coffret pour la réception en télégraphie. On verra que dans le cas de travail en duplex, à bord d'un navire, le poste émetteur étant nécessairement très voisin du récepteur, il y a lieu de prendre certaines précautions pour éviter la surcharge du récepteur par l'émetteur.

La différence entre les fréquences reçues et les fréquences transmises est généralement de 5 pour 100 seulement de sorte que les courants induits par le poste émetteur dans l'antenne de réception sont généralement élevés. Ces courants peuvent être amortis de telle sorte qu'ils n'influencent pas le récepteur ; autrement dit, il est nécessaire de prévoir un filtre extrêmement sélectif entre l'antenne de récep-

tion et le poste récepteur. Sur les avions le récepteur est généralement éloigné de l'opérateur et réglé par commande à distance.

On a tendance à employer une antenne rigide de préférence à une antenne traînante, la première ayant l'avantage de permettre une réception satisfaisante à terre. On n'emploie généralement pas de superhétérodyne du fait de la difficulté de maintenir constante la fréquence hétérodyne. Les récepteurs pour avions doivent être légers, d'une installation et d'un maniement faciles et de construction simple; de plus ils doivent être étudiés de manière à résister aux vibrations continues et à des chocs mécaniques considérables. Actuellement on utilise un ou deux étages d'amplification haute fréquence, un détecteur et un ou deux étages basse fréquence. Les étages haute fréquence sont généralement accordés par commande unique de plusieurs condensateurs. L'alimentation est fournie par une dynamo entraînée soit par une hélice soit dans certains cas par le moteur. En cas d'imprévu on emploie des batteries.

En somme, on peut dire que l'étude des récepteurs commerciaux consiste actuellement à éliminer les interférences, à réaliser la simplicité des réglages et à assurer leur bon fonctionnement.

Le radio récepteur tend donc à n'être pas autre chose qu'un répéteur dans le circuit reliant deux bureaux centraux situés chacun à une extrémité. Ce répéteur a pour rôle de collecter une faible partie de l'énergie haute fréquence, reçue de la station émettrice, de séparer cette énergie de toutes les interférences possibles, de l'amplifier 100 000 fois environ et de l'envoyer à un bureau central, à un niveau correspondant à celui auquel elle est émise par le bureau central éloigné. Par conséquent, l'appareil permettant de satisfaire à ces conditions doit être quelque peu compliqué et, si l'on s'impose des conditions de sécurité, chaque élément du récepteur doit être prévu pour fonctionner très longtemps sans aucune surveillance.

Le répéteur à 4 fils couramment employé est aujourd'hui un élément sur lequel on peut compter, mais il est extrêmement simple si on le compare à un radio récepteur commercial. Les perfectionnements en matière de sécurité en radio réception commerciale, ont été réalisés par une étude soignée des détails et par l'application des connaissances et des méthodes de l'ensemble de la technique téléphonique; comme dans tous les travaux de ce genre, les essais conduits scientifiquement et minutieusement ont été les causes essentielles du succès.

RÉCENTES ÉTUDES SUR LES RELAIS ÉLECTROMAGNÉTIQUES EMPLOYÉS EN TÉLÉPHONIE ⁽¹⁾

par M. Van MIERLO

Ingénieur au Laboratoire International de Téléphonie et Télégraphie.

1. *Introduction.* — 2. *Considérations générales.* — 3. *Construction.* —
4. *Fonctionnement.* — 5. *Conclusion.*

1. — INTRODUCTION

Depuis l'apparition de la téléphonie automatique, l'usage des relais s'est répandu à tel point et les conditions à remplir sont devenues si nombreuses, que ces appareils représentent une grande partie des installations automatiques. Pour de petites installations, on a même parfois utilisé exclusivement des relais et évité tout sélecteur ou appareil analogue.

On peut se faire une idée de l'importance du domaine conquis en notant que dans un bureau automatique desservant 10 000 lignes d'abonnés, il faut environ 50 000 relais. L'établissement d'une seule communication exige l'intervention d'une centaine de relais. Il n'est donc pas étonnant qu'une usine téléphonique puisse avoir à fabriquer couramment plus de 1/2 million de relais par an. Dans le monde entier, on en compterait probablement 100 à 200 millions actuellement.

Du fait du grand nombre de relais à construire et des conditions multiples qu'ils doivent remplir aujourd'hui, les constructeurs se trouvent dans l'obligation de résoudre une foule de petits problèmes. Bien que le relais soit en principe un appareil très simple, son étude est très complexe et je me propose de vous donner un aperçu des principales questions soulevées en soulignant certaines d'entre elles.

(1) Ce rapport sera présenté et discuté au cours de la Semaine de discussions de novembre, le samedi 29 novembre 1930.

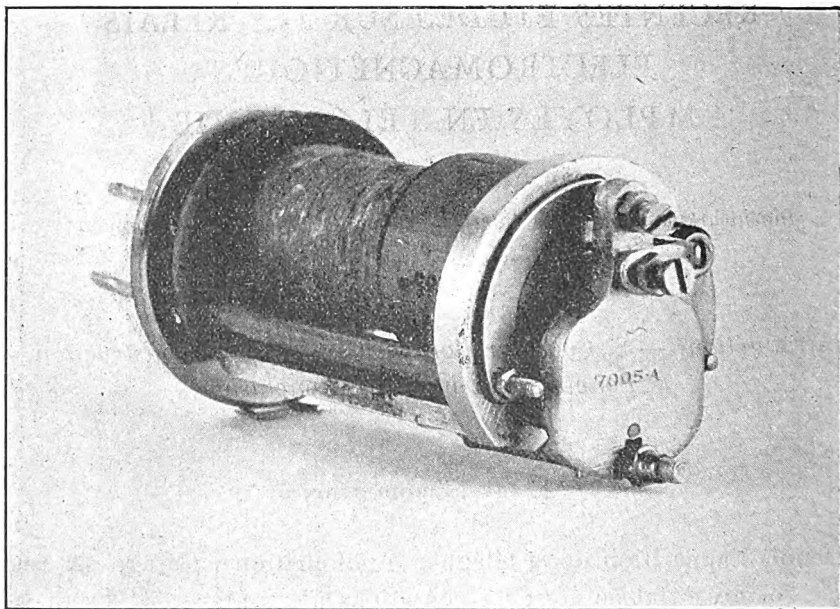


Fig. 1. — Relais du type rond.

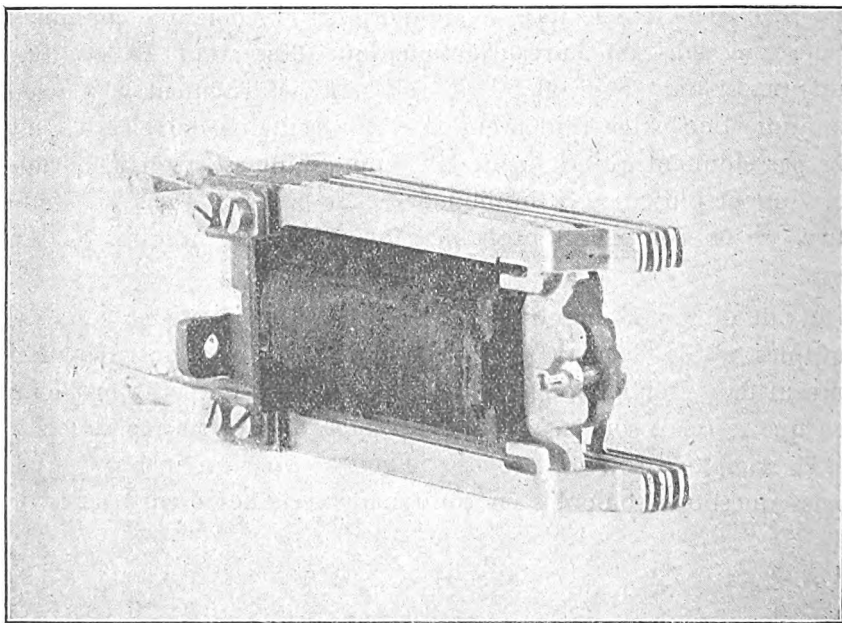


Fig. 2. — Relais du type plat E.

2. — QUELQUES CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

J'énumérerai seulement quelques questions générales qui ont leur importance :

Le prix, les frais d'entretien, la consommation de courant.

Les dimensions, le poids, les facilités de montage.

L'espace occupé.

Les facilités d'assemblage (fabrication en série), de réglage, d'entretien, de mise en magasin.

Au point de vue du fonctionnement, il conviendrait d'utiliser un grand nombre de types différents, afin que chacun soit le mieux adapté aux fonctions à remplir. D'autre part, il est important au point de vue prix, etc., de réduire le nombre de types au minimum. L'équilibre de ces conditions dépend de nombreux facteurs, mais il se fait qu'on utilise actuellement plusieurs dizaines de types de relais nettement différents. On se trouve donc conduit à chercher des combinaisons nouvelles qui permettent de réduire le nombre de types de relais tout en assurant un bon fonctionnement dans des conditions très variées. Il importe de ne jamais oublier que le choix d'un certain relais est fondé sur un ensemble de considérations diverses et non pas exclusivement sur les conditions qu'il doit remplir dans le circuit où il est utilisé.

Les fig. 1 à 8 montrent une série de relais, dont nous indiquerons très sommairement quelques caractéristiques.

Relais lents :

Le relais numéro 7005 A, ainsi que d'autres, sont du type rond. Ils ne sont plus utilisés beaucoup, mais sont encore indiqués quand il faut un temps de fonctionnement ou de relâchement assez grand (fig. 1). Dans ce cas, ils sont munis d'une bague en cuivre visible sur la figure.

Relais plats pour usages divers

Toutes les pièces sont estampées et interchangeables. L'espace nécessaire est sensiblement réduit.

C'est le type E qui est construit pour usage général et est utilisé en très grandes quantités. Il peut comprendre 12 ressorts et il existe une soixantaine de combinaisons de ressorts diverses (fig. 2).

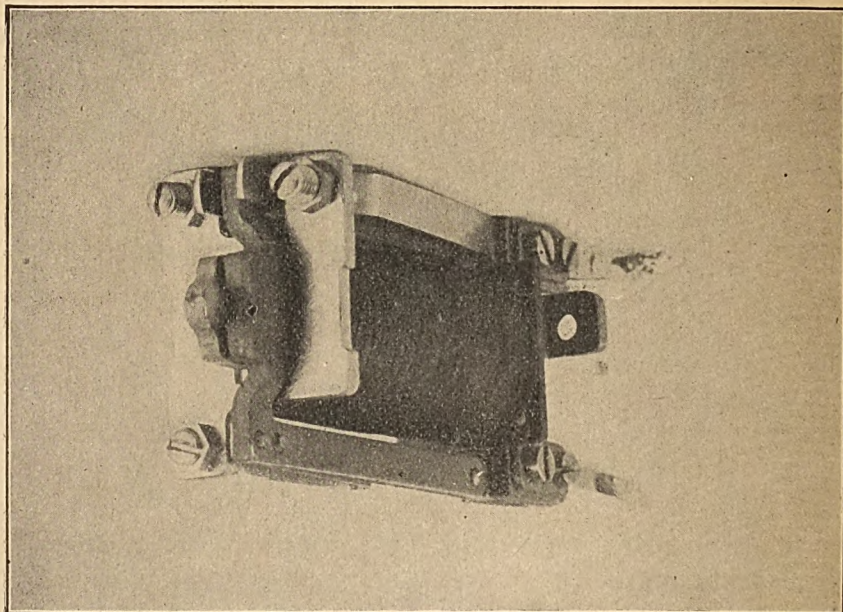


Fig 3. — Relais du type plat à réglage par vis.

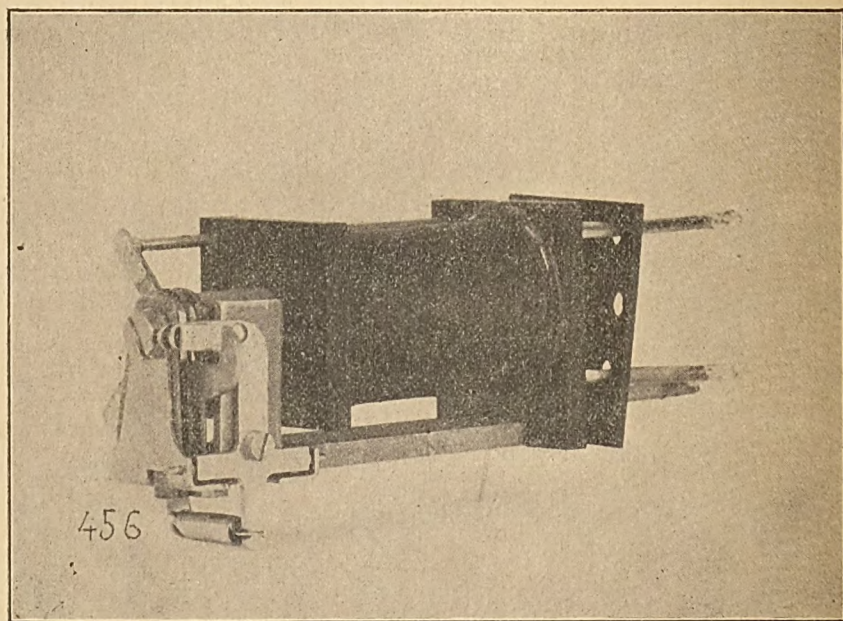


Fig. 4. — Relais rapide à armature latérale.

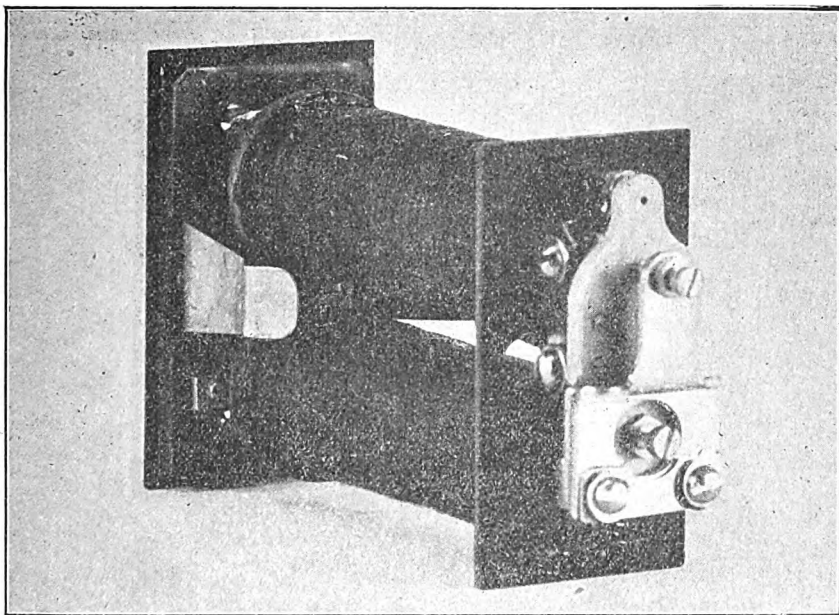


Fig. 5. — Relais pour courant alternatif (attraction variable).

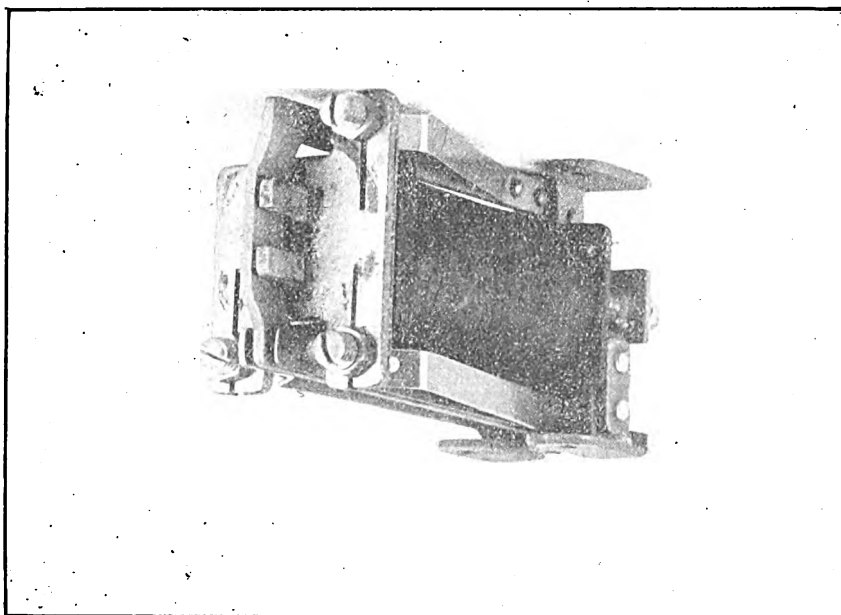


Fig. 6. — Relais plat à courant alternatif (attraction uniforme).

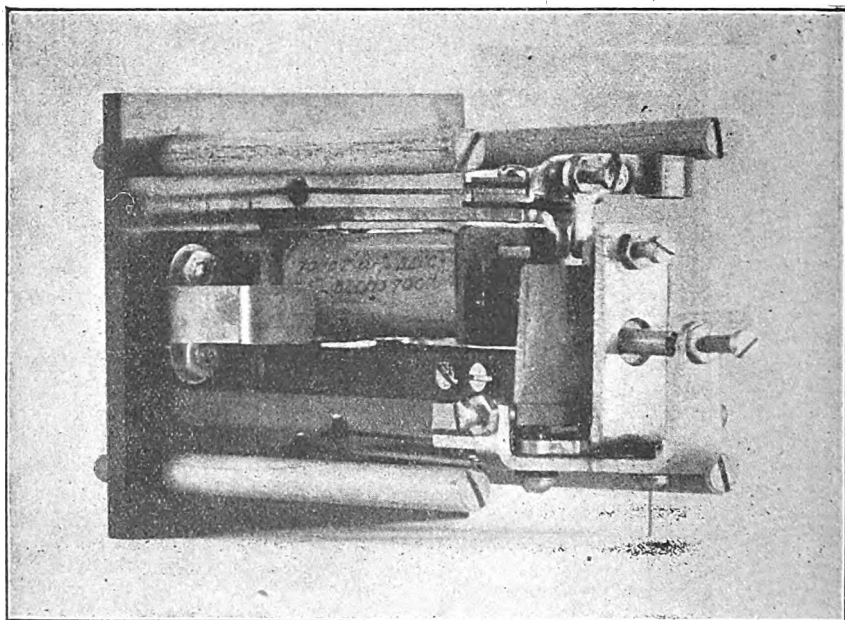


Fig. 7. — Relais double à courant alternatif.

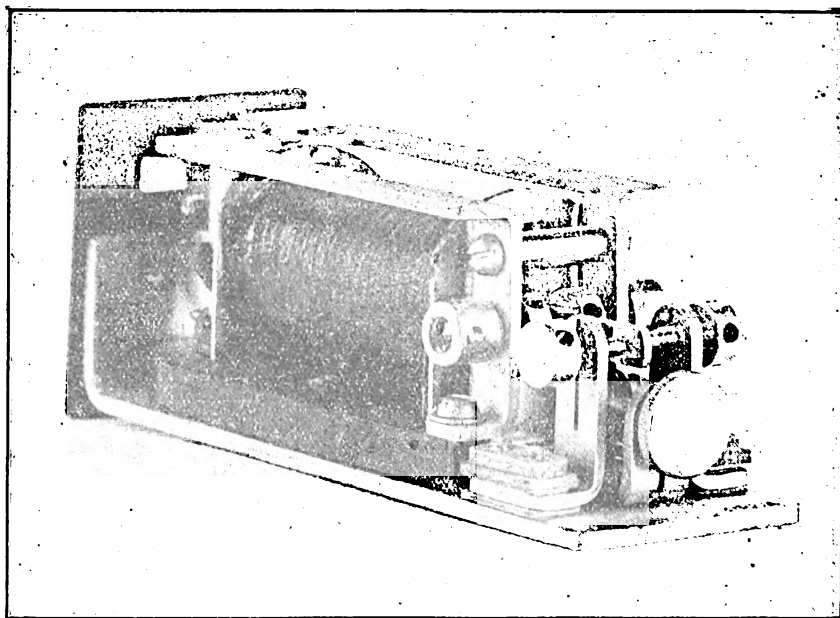


Figure 8. — Relais polarisé.

Le type H est semblable au précédent, excepté quelques lamelles d'acier au silicium qui augmentent son impédance pour courants de fréquence vocale

Le type R est semblable au type E, mais la forme de la section du noyau est ovale et permet ainsi de loger plus de tours de moindre résistance. Il remplace le type E.

Les types delta 1, delta 2, et delta 3 correspondent aux types E.H. et R mais permettent un réglage plus fin à l'aide du dispositif utilisé pour les relais B et G mentionnés ci-dessous (voir fig. 3).

Relais de supervision du type « plat »

Le type B a un noyau de section très faible de manière à pouvoir obtenir un flux assez constant, donc un relâchement assez constant pour des courants de valeurs très variables, c'est-à-dire pour des longueurs de ligne très inégales. Pour obtenir un flux suffisant, on utilise de l'acier au silicium. Le relais est muni d'un couvercle mince contre la poussière. Le type G a un noyau lamellé de plus forte section, de manière à obtenir une impédance assez forte. Contrairement au précédent, il est placé en dérivation sur la ligne. Un couvercle individuel de forte épaisseur évite la diaphonie.

Les relais des types B et G ont un réglage à vis. Les pressions de contact sont très faibles

Relais rapides (Impulsions)

Le relais à armature latérale a une armature légère qui permet de lui faire suivre facilement les impulsions utilisées dans les systèmes automatiques (10 par seconde environ) (fig. 4).

Le relais du type 7005 a une double bobine et une armature assez légère. Sa sensibilité et facilité de réglage l'indiquent spécialement pour les cas où des impulsions d'une faible intensité doivent être reçues.

Relais à courant alternatif

Ce relais est du type 196 et a un noyau divisé en acier au silicium. L'armature est légère. Il sert comme relais de ligne quand le courant reçu est très faible. La pression de contact est assez faible. On n'utilise que le contact de repos, qui est rompu lors du fonctionnement (fig. 5).

Le relais du type 87 a une armature de grande masse pour réduire les vibrations et assurer un bon contact de travail.

On peut aussi accoupler les armatures de deux relais dont les phases sont décalées de manière à obtenir une attraction totale plus uniforme.

Le relais du type J est celui qu'on utilise le plus en courant alternatif. Il est du type plat et occupe donc peu de place. Son fonctionnement sera décrit plus loin (fig. 6).

Fig. 7. — C'est un relais à double circuit magnétique et armature unique. Les phases des flux sont décalées de 90° environ et l'attraction est très uniforme. L'armature est facilement ajustable. Il sert pour la réception d'impulsions transmises à l'aide de courant alternatif de 50 périodes.

Relais polarisés

Fig. 8. — Nous n'indiquons que le relais numéro 7006. Le circuit magnétique ressemble à un pont de Wheatstone, dont l'armature serait une diagonale, l'aimant formant l'autre. L'armature légère est entourée d'une bobine qui détruit l'équilibre. Les pièces polaires ainsi que les contacts peuvent être ajustés à l'aide de vis.

Il est très sensible et tout indiqué pour la discrimination des courants faibles de sens différents. Les pressions de contact sont faibles. Un arrangement spécial atténue beaucoup les vibrations. Un type légèrement différent est disposé de manière à pouvoir être enlevé aisément pour réajustage. Un type plus grand est particulièrement sensible.

Nous ne parlerons pas de beaucoup d'autres types, tels que le relais thermique, le relais à dash pot, etc.

3. — CONSTRUCTION

Voici maintenant quelques particularités se rapportant plus spécialement à la construction des relais, au cours de laquelle il y a généralement lieu de considérer la bobine, son circuit magnétique, les contacts, les dispositions à prendre pour le réglage et le montage.

3.1. Bobines

Dans la plupart des cas, on utilise du fil de cuivre, mais parfois aussi, en partie, des alliages de grande résistance spécifique. Ce fil est presque toujours isolé à l'émail, parfois à la soie, et exceptionnellement à l'émail et la soie. L'émail prend moins de place, et permet

donc de placer plus de tours dans un volume donné. Les enroulements peuvent être simples ou multiples et sont protégés mécaniquement par un recouvrement en toile, coton, soie, etc., sur lequel on fait figurer toutes indications utiles. Ce recouvrement peut contribuer à préserver l'enroulement des effets nocifs de l'humidité.

Il est important en effet d'éviter la corrosion des fils qui sont parfois de petit diamètre et dont les parties soumises à un potentiel positif par rapport à un conducteur voisin ou à une autre partie de l'enroulement, sont particulièrement exposées, à cause des possibilités d'électrolyse. Il est prudent pour cette raison de ne pas utiliser de fils de moins de 0,1 mm de diamètre. Les soudures sont toujours des parties particulièrement dangereuses au point de vue de la corrosion. Des études sont faites pour trouver un dispositif permettant de les éviter complètement.

Il faut aussi veiller aux autres isolants utilisés pour les joues, sur les noyaux et entre les enroulements. On se montre très sévère sur leurs qualités.

La possibilité de court-circuit entre spires impose parfois l'utilisation d'un isolement spécial du fil (émail et soie). Nous verrons plus loin l'effet de ces courts-circuits sur le fonctionnement et sur l'impédance.

Généralement, les enroulements sont essayés à 500 V.

3.2. *Circuits magnétiques*

Au sujet de la forme générale à adopter pour un relais, on peut dire qu'ils ne doivent pas être trop longs pour éviter trop de dispersion, ni trop courts pour éviter une dépense trop forte en cuivre. La meilleure solution dépend de nombreux facteurs, dont l'un est le temps pendant lequel le relais est en service réel. Il serait économique de réduire la consommation de courant dans le cas où le relais se trouve en service prolongé, quitte à augmenter son prix.

Au cours de la construction, il convient de ne pas oublier que la réluctance de l'entrefer doit être du même ordre que celle du reste du circuit magnétique. Comme matériaux magnétiques, on utilise le fer doux, l'acier très doux, l'acier au silicium et le permalloy. La perméabilité doit être élevée et la force coercitive faible. Le recuit est particulièrement important et l'on est conduit à des installations très coûteuses comportant un appareil enregistreur. Dans les fours à recuire, le métal est généralement entouré de matières évitant l'oxyda-

tion. Il faut veiller à ce que certains éléments comme le carbone, passent de ces matières au fer à recuire.

La section du noyau est autant que possible circulaire ou ovale pour faciliter l'enroulement et réduire la longueur des spires. On a aussi recours à des pièces plates découpées celles-ci étant plus économiques.

L'entrefer des relais est souvent de l'ordre du dixième de millimètre. On le réalise à l'aide de plaquettes de maillechort.

On utilise des relais polarisés dans le cas de relais très sensibles ou devant opérer avec un courant de sens donné. La sensibilité est accrue du fait que l'effet exercé sur l'armature comporte une composante proportionnelle au flux de l'aimant. Cette attraction étant proportionnelle au carré de flux total on a :

$$(\Phi_1 + \Phi_2)^2 = \Phi_1^2 + \Phi_2^2 + 2\Phi_1\Phi_2$$

ou Φ_1 est le flux de l'aimant et Φ_2 celui de l'enroulement. Comme Φ_1 peut être très élevé, le produit $\Phi_1\Phi_2$ pourra être grand, même si Φ_2 est petit, c'est-à-dire si le courant reçu est faible.

3.3. Contacts

Des recherches systématiques ont été faites sur les métaux et alliages convenant spécialement aux contacts téléphoniques. Ces contacts doivent être bon marché, de faible résistance et de faible usure. Ils doivent rester en excellent état pendant plusieurs années et pouvoir effectuer des dizaines ou même des centaines de millions de contacts. Quand le contact a lieu entre des pièces flexibles, celles-ci doivent parcourir un certain trajet pour que la pression nécessaire soit obtenue. Dans le cas d'usure des contacts, ce trajet est diminué et la pression sera réduite ou le contact ne se fera plus. De plus, les conditions d'opération (attraction et relâchement) se modifient et le relais pourrait ne plus remplir ses fonctions dans le circuit.

Le métal employé ne doit pas s'oxyder à l'air. Sa température de fusion doit être élevée et il doit être malléable et ductile, mais toutefois assez dur pour résister à l'aplatissement. L'or, l'argent, le platine et leurs alliages conviennent particulièrement bien. D'autres alliages de ces métaux peuvent être également envisagés. Le tungstène possède en général une résistance de contact trop élevée, due à son oxydation. L'iridium est trop cher. L'alliage argent-cuivre est intéressant, si on s'impose un faible prix de revient et si on ne se montre pas trop exigeant sur la qualité électrique du contact.

La forme des contacts et le sens du courant ont une grande importance. Le phénomène en lui-même est d'ailleurs très complexe, et en première approximation on peut distinguer 3 cas distincts : décharge ordinaire à la rupture, formation d'arc, et effet d'un courant fort à la fermeture (p. ex. décharge d'un condensateur). Dans le cas particulier où l'arc prédomine, il y a transfert de matière de la cathode à l'anode, phénomène opposé à celui que l'on observe avec des électrodes à charbon.

Quand on examine un contact au microscope on remarque une partie centrale qui est la partie active du contact. La surface est très irrégulière et épouse probablement assez étroitement l'autre partie du contact. Lorsque ces deux surfaces se séparent, il y a une série de phénomènes compliqués et dégagement de vapeur de métal plus ou moins ionisée. Cette vapeur se dépose sur les parties adjacentes et forme une couronne sombre. Celle-ci est très curieuse à examiner au microscope binoculaire. Ce dépôt se présente parfois sous la forme d'une végétation touffue, provenant probablement d'une succession de dépôts de particules électrisées sur les sommets des dépôts précédents, sous l'influence du champ électrostatique entre les deux parties du contact. Il se forme en somme toute une série de filaments plus ou moins parallèles et parfois assez longs.

La résistance de contact pour une pression de 8 à 15 g est de l'ordre de quelques centièmes d'ohm.

Après un certain temps de fonctionnement, la résistance peut être de quelques dixièmes et même de plusieurs ohms. Pour des pressions très faibles, on peut observer des résistances très élevées dues probablement à des particules d'oxyde, de poussières étrangères ou métalliques provenant du contact même.

Avec certains métaux, il se forme à la surface une pellicule très mince et invisible d'oxyde quand le contact n'est pas en service. Cette pellicule donne une résistance de contact plus élevée à moins qu'elle ne soit percée par une pression suffisante.

Pour protéger les contacts, on utilise des shunts qui réduisent la tension aux bornes. Nous ne considérerons que les cas suivants montrés par la fig. 9 :

- 1 a. — Résistance en shunt sur le contact.
- 2 a. — Résistance en série avec condensateur sur le contact.
- 1 b. — Résistance en shunt sur les appareils.
- 2 b. — Résistance en série avec condensateur sur les appareils.

Les cas 1 a et 1 b sont les solutions les plus économiques, mais dans le premier cas, le courant n'est pas coupé entièrement. Dans le second cas, le temps de relâchement et éventuellement d'opération de l'appareil est affecté.

Les solutions 2 a et 2 b sont meilleures, mais plus onéreuses du fait de la présence du condensateur. 2 a a parfois de légers avantages sur 2 b. Cette dernière solution est parfois la plus économique si le circuit peut être ouvert en plusieurs endroits, puisqu'une résistance suffit pour protéger tous les contacts. 2 a ne convient pas en courant alternatif

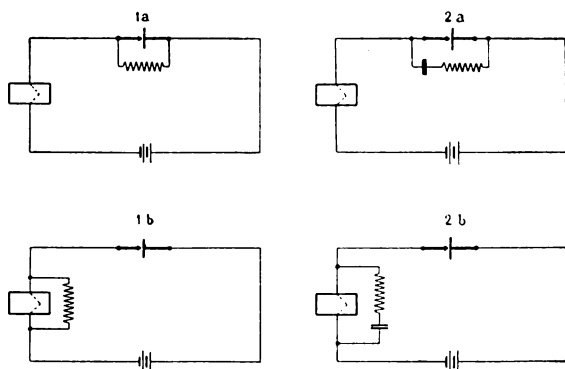


Fig. 9. — Etouffeurs d'Étincelles.

On est tenté de calculer les valeurs les mieux appropriées de R et de C et on en a conclu que R doit être égal à la résistance du relais, et C égal à $\frac{L}{R^2}$ où L est le coefficient de self du relais. Ceci conduit cependant à une capacité beaucoup trop élevée. R doit être assez faible pour que la tension aux bornes du contact se trouve comprise entre certaines limites, mais ne doit pas être trop élevée parce qu'alors la décharge du condensateur serait très nuisible au contact. De toute manière, le courant ne pourra pas être trop élevé si on veut éviter la formation d'arcs qui détruisent rapidement le contact malgré toute protection, et même si la self du circuit est faible. La limite admissible de courant dépend du métal employé et de la tension de la batterie. Les alliages ne sont en général acceptables que s'ils se présentent sous la forme de solutions solides et non de mélanges eutectiques. Pour le platine, on peut admettre 1 A pour 48 V. Si on impose une limite à l'intensité, il faut aussi que l'énergie du circuit, c'est-à-dire la valeur de la self et celle du courant ne soient pas trop élevées. On

a relevé des courbes pour les appareils les plus courants dans le but de se rendre compte aisément si l'énergie n'est pas trop élevée dans un cas donné.

Dans le cas où il faut rompre des courants très intenses, il devient nécessaire de faire usage de contacts plus grands, susceptibles de supporter l'usure et d'être nettoyés. Le tungstène est intéressant dans ce cas, si l'on dispose d'une bonne pression.

Un contact doit avoir une surface bien lisse et ne doit pas être exposé ni à la poussière ni à certains gaz et vapeurs. A défaut de ces précautions le meilleur contact même dans le cas de faibles intensités pourra être mis rapidement hors d'usage.

Quand un relais opère, il ne ferme que rarement ce contact d'une manière franche. Très souvent, on constate des vibrations et par conséquent, le courant contrôlé peut être interrompu ou déformé. On s'efforce de réduire ou d'éviter ces vibrations en disposant les ressorts convenablement. Les vibrations sont nuisibles dans le circuit et dans le relais même, puisque le nombre d'interruptions est considérablement augmenté.

Certains relais soumis à de très faibles énergies sont munis de pièces légères qui se touchent normalement de manière à ne présenter qu'une faible résistance. Au cours de leur déplacement, sous l'influence du courant alternatif, la résistance de contact est notablement accrue. Ce contact variable est placé en shunt avec un relais ordinaire. Pour obtenir un fonctionnement sûr, une construction soignée s'impose.

3.4. Réglage

Le réglage des relais se fait en pliant plus ou moins les ressorts, ou en les déplaçant à l'aide de vis. Pour les réglages délicats, où il s'agit de pressions de l'ordre du gramme ou de temps de fonctionnement compris dans des limites très étroites, il faut s'attendre à des difficultés. L'influence de la température sur les isolants et les autres matières, la fatigue des ressorts consécutive à l'état de tension, l'usure des contacts par volatilisation et martelage, font que l'ajustage peut changer suffisamment pour affecter le fonctionnement de ces relais délicats.

3.5. Montage

Les relais téléphoniques se montent d'habitude sur des plaques d'acier. Les ressorts passent en partie par des ouvertures munies de

pièces isolantes. Les plaques de montage peuvent être disposées de manière à ce que l'influence magnétique mutuelle des relais soit très réduite. On peut munir chaque relais d'un couvercle ou prévoir un seul couvercle pour toute la plaque. Ces couvercles servent à préserver les relais de la poussière, mais peuvent aussi jouer le rôle d'écran magnétique. Dans le but d'éviter leur influence sur le réglage, certaines parties peuvent être prévues en matière non magnétique. Dans le cas de couvercles individuels servant à éviter l'influence de champs magnétiques variables extérieurs, la partie antérieure seule est mobile pour le réglage.

4. — FONCTIONNEMENT

4.1. *Calcul des Enroulements.*

L'espace occupé par un fil est $0,9 d^2$ (d =diam. extérieur) pour un enroulement presque parfait. En pratique, pour chaque diamètre et chaque espèce d'isolement on utilise un facteur K déterminé par expérience. On tient compte des limites dans lesquelles le diamètre de cuivre et la résistance peuvent pratiquement varier. Tous calculs faits on vérifie enfin si le relais n'est pas trop plein dans le cas où le fil a un diamètre de cuivre et une épaisseur d'isolement maximum.

On distingue d'habitude deux cas : 1° celui où le nombre de tours peut être approximatif, mais avec une résistance exacte à 5 0/0 près ; 2° celui où le nombre de tours doit être exact et où la résistance peut varier de 10 0/0

Le calcul est évidemment plus compliqué dans le cas de plusieurs enroulements. Les courbes peuvent dans ce cas éviter une grande perte de temps.

4.2. *Echauffement.*

Les services rendus par un relais sont limités par son élévation de température. On admet comme limite une température qui est évidemment inférieure à celle à laquelle les isolants pourraient être affectés. Cette règle est suivie autant que possible même dans le cas où un dérangement (terre, court-circuit, etc.) est susceptible de laisser passer un courant anormal. Dans ce cas, on admet une limite de l'ordre de 120° C. pour l'émail et 170° C. pour la soie. En tous cas, il faut dans ces conditions éviter tout danger d'incendie.

L'élévation de température dépend du genre de montage, des couvercles, de la proximité d'autres appareils. La résistance électrique variant avec la température, il est souvent important d'en tenir compte, particulièrement dans le cas d'appareils en série ou en dérivation.

Généralement, la tension aux bornes est constante et le courant décroît quand la température croît.

4.3. Opération.

Le relais doit actionner un ou plusieurs ressorts de contact produisant des pressions différentes et ayant des courses différentes. Pour

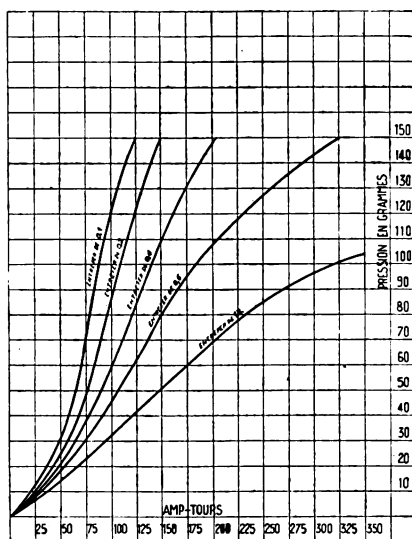


Fig. 10. — Courbes de la pression donnée par un relais E en fonction des ampères-tours.

calculer l'enroulement, on doit déterminer le nombre d'ampères-tours nécessaires dans chaque cas et il importe donc d'établir pour un type de relais donné, une série de courbes donnant la pression obtenue en fonction du nombre d'ampère-tours et de l'entrefer.

La fig. 10 montre une série de courbes de ce genre.

Pour un type de relais donné, il faut un minimum d'ampère-tours. Il y a lieu également de tenir compte du nombre de ressorts, de leur épaisseur et de la pression que l'on veut assurer entre les contacts (par exemple, 8 ou 15 g). Il existe un maximum par exemple 300 am-

père-tours qu'il ne serait pas économique de dépasser, même si l'échauffement le permet. Il faut alors prévoir une section de fer plus grande.

L'entrefer est déterminé par : l'entrefer après opération, la séparation des contacts avant opération, la quantité dont les ressorts ont fléchi pendant l'opération. Sauf dans le cas de fortes pressions qui rappellent l'armature en arrière, il faut un entrefer de l'ordre de 0,05 à 0,3 mm pour assurer le relâchement. Cette condition est réalisée, soit à l'aide de plaquettes non magnétiques, soit par une vis de réglage. L'espace compris entre les contacts et la quantité dont les ressorts fléchissent sont de l'ordre du dixième de millimètre.

Il va de soi que les courbes donnant la pression en fonction du nombre d'ampère-tours doivent être soigneusement établies et qu'elles doivent tenir compte des variations inévitables dans la perméabilité du fer dues à sa constitution, au recuit et aux inégalités d'assemblage.

La spécification de l'ajustage devra prévoir une certaine marge, par exemple 5 à 10 pour 100 entre les ampère-tours servant de base au calcul et les ampère-tours que le relais reçoit dans le circuit dans les cas les plus désavantageux, ou entre les ampère-tours de relâchement calculés et réels.

L'influence des couvercles doit également être prise en considération. Un couvercle en fer pourra diminuer la dispersion et réduire le nombre d'ampère-tours nécessaire au fonctionnement. Ce couvercle est alors défavorable au relâchement. Pour éviter des ennuis de ce genre, certains couvercles sont en deux parties, celle de devant s'ouvrant pour permettre le réglage.

Il faut aussi être prudent relativement à l'influence de champs magnétiques extérieurs, pouvant provenir d'autres relais adjacents ou d'autres appareils.

La résistance des enroulements devra être aussi élevée que possible afin de réduire la consommation de courant.

Je passe sur diverses petites difficultés qui se présentent dans le calcul relatif à l'opération des relais et je me bornerai à quelques considérations concernant le non fonctionnement et le relâchement.

4.4. Non fonctionnement et relâchement.

Beaucoup de relais ne doivent fonctionner que lorsque le courant atteint une certaine intensité. Il faut une certaine marge entre le courant de non fonctionnement et le courant de fonctionnement. Cette

marge pourrait être faible, s'il ne fallait pas tenir compte des vibrations mécaniques et des petites variations d'ajustage. Quand il s'agit de contacts à fermer, on peut considérer 75 pour 100 du courant de fonctionnement comme une limite satisfaisante. Si le relais est muni de contacts qui sont rompus lors de l'opération il faut tenir compte de la diminution de la pression sur les contacts de repos. Il est bon d'admettre comme limite un nombre d'ampère-tours qui réduit cette pression de moitié. Le courant de relâchement dépend de l'entrefer et de la pression en arrière. On établit aussi dans ce cas une série de courbes qui servent de base au calcul. En calculant un relais, il y a lieu de tenir compte du magnétisme rémanent résultant d'une opération précédente. Il est souvent nécessaire de compter sur cet effet qui peut réduire les ampère-tours d'opération (et de non-opération) par exemple de 10 pour 100.

4.5. Vitesse de Fonctionnement.

Considérons un cas assez général où le flux traverse un circuit électrique secondaire fermé. Celui-ci peut être formé soit par un enroulement systématiquement en court-circuit, soit par des spires accidentellement en court-circuit, soit par des masses métalliques, comme le noyau même, les joues, un couvercle, etc.. Nous supposons qu'il n'y a pas de dispersion magnétique.

Nous aurons :

$$\begin{aligned} i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} &= E \\ i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} &= 0 \end{aligned}$$

Comme nous supposons $M = L_1 L_2$ on obtient :

$$i_1 = \frac{E}{R_1} \left[1 - \frac{T_1}{T_1 + T_2} e^{-\frac{t}{T_1 + T_2}} \right] \quad (1)$$

où

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1} \text{ et } T_2 = \frac{L_2}{R_2}$$

$$i_2 = \frac{E}{R_1} \frac{M}{L_2} \frac{T_2}{T_1 + T_2} e^{-\frac{t}{T_1 + T_2}} \quad (2)$$

Le flux résultant est :

$$N = A n_1 \frac{E}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1 + T_2}} \right) \quad (3)$$

où A est une constante et n_1 le nombre de tours de l'enroulement.

Nous allons examiner quelques points intéressants qui sont basés sur ces formules.

Elles montrent d'abord l'influence de E . Le temps de fonctionnement sera plus petit si E est plus grand. Dans certains cas, on peut s'aider de la formule empirique

$$t_1 = t \sqrt{\frac{E}{E_1}}$$

pour juger de l'influence de E sur le temps t .

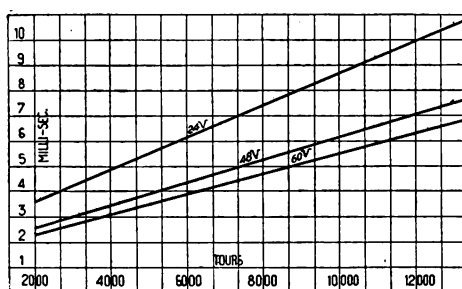


Fig. 11. — Temps de fonctionnement de relais E en fonction du nombre de tours et de la tension de la batterie pour un réglage donné et un nombre d'ampères-tours fixe de 250.

Les courbes de la fig. 11 montrent l'influence de E et de L (qui dépend du nombre de tours) sur le temps de fonctionnement d'un relais du type E , le nombre d'ampère-tours étant constant et égal à 250.

Considérons le cas où il n'y a pratiquement pas de circuit secondaire fermé, nous obtenons :

$$i_1 = \frac{E}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (4)$$

La formule (4) donne les courbes d'établissement de courant bien connues. Ces courbes pourraient être calculées si l'on connaissait L . Or, quand on cherche à connaître L , on s'aperçoit qu'il y a là une difficulté réelle. Ce coefficient est en effet variable et dépend de l'induction magnétique, c'est-à-dire de l'entrefer, du courant du nombre de tours, de l'état magnétique du fer.

Les courbes fig. 12 donnent une idée de la variation du coefficient de self d'un type déterminé de relais. Les courbes 1, 2, 3 se rapportent à des entrefers différents et sont calculées d'après le flux produit par l'enroulement. La courbe 4 est obtenue en tenant compte des flux

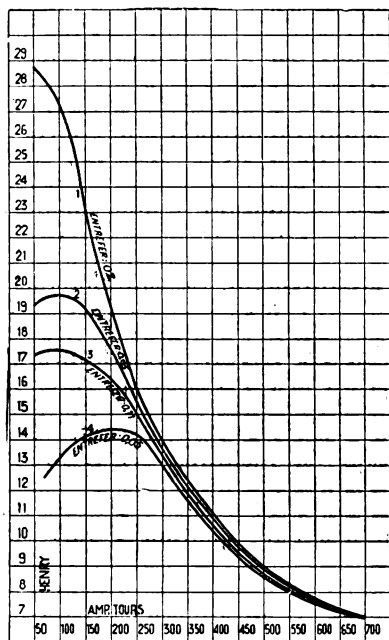


Fig. 12. — Coefficient de self du relais E en fonction des ampères-tours. Nombre de tours : 10 000
 $R=1\,000$ ohms. La courbe n° 4 tient compte des flux transitoires.

transitoires dûs aux courants de Foucault dans le fer et aux spires en court-circuit. La figure 13 montre comment le courant s'établit dans

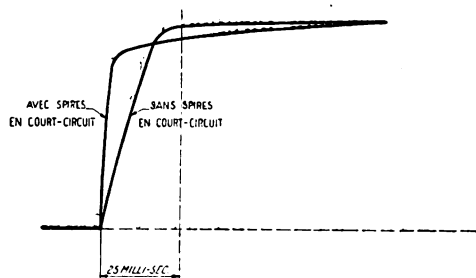


Fig. 13. — Courbes d'établissement de courant dans relais avec et sans spires en court-circuit.

un relais avec et sans spires en court-circuit. Le courant croît plus rapidement au début dans le second cas.

L est donc une valeur qui varie à chaque instant pendant le fonctionnement du relais et une mesure assez correcte est laborieuse. Ces valeurs sont encore distinctes de la valeur en courant alternatif qui, elle, dépend de la fréquence et de l'intensité du courant.

En pratique, il est plus facile de faire des mesures de temps directes, plutôt que de calculer le temps par la formule (4). On pourrait croire qu'un relevé oscillographique d'une courbe variable permettrait de déterminer le temps d'opération. En effet, il semble qu'il suffise de voir à quel moment le courant a une valeur telle que le produit $n_1 i_1$ est égal au nombre d'ampères-tours nécessaire au fonctionnement du relais. Ce raisonnement est complètement faux, car dans la plupart des cas, même sans enroulement systématiquement en court-circuit, le noyau, les autres circuits métalliques et les spires accidentellement en court-circuit influent de telle sorte que le flux résultant ne croît pas proportionnellement au courant primaire, ce que l'on peut voir en comparant les formules (1) et (3). Nous sommes donc autorisés à concevoir l'existence d'un courant de fonctionnement « dynamique » qui peut être par exemple 3 fois supérieur au courant « statique ».

Dans cet ordre d'idées, il est intéressant d'examiner ces formules d'un peu plus près. Nous sommes habitués à penser que le courant croît *graduellement* de zéro à la valeur $\frac{E}{R}$. Dans le cas où il n'y a pas de dispersion (condition à peu près réalisable), le courant a au contraire une valeur instantanée assez élevée. Si l'on fait $t=0$ dans (1) et (2), on a en effet :

$$i_1 = \frac{E}{R_1} \frac{T_2}{T_1 + T_2} \text{ et } i_2 = - \frac{E}{R_1} \frac{M}{L_2} \frac{T_2}{T_1 + T_2}$$

Ainsi dans le cas d'un noyau toroïdal (bobine translatrice) à deux enroulements identiques répartis uniformément sur toute la périphérie on a sensiblement $L_1 + L_2 = M$, ce qui donne :

$$i_1 \frac{E}{2 R_1} \quad i_2 = - \frac{E}{2 R_1}$$

Le courant secondaire est égal et opposé au courant primaire. Quant au flux résultant, celui-ci croît graduellement de 0 à la valeur normale.

Remarquons que ce cas conduit facilement à des conclusions erro-

nées. Du fait que le courant dans le primaire est, pendant un certain temps tout au moins, supérieur au courant

$$\frac{E}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right)$$

correspondant au cas de secondaire ouvert, on a parfois conclu que la self apparente du primaire est diminuée. Ceci est vrai en courant alternatif, mais dans notre cas, la notion « self apparente » a peu de signification. Comme nous l'avons vu, le courant dans les deux enroulements a instantanément une valeur bien définie. La « self » serait alors nulle. Le courant du primaire (dans le cas simplifié déjà considéré) a la valeur :

$$i_1 = \frac{E}{R_1} \left(1 - \frac{1}{2} e^{-\frac{t}{2 T_1}} \right)$$

ce qui peut s'écrire :

$$i_1 = \frac{E}{2 R_1} + \frac{E}{2 R_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{2 T_1}} \right)$$

Abstraction faite du courant initial $\frac{E}{2 R_1}$, l'accroissement est donc plus lent que dans le cas de secondaire ouvert. En apparence la constante de temps et la self sont *doublées*.

Quant au flux, celui-ci dépend du courant dans les deux enroulements, donc de :

$$i_1 - i_2 = \frac{E}{R_1} \left(1 - \frac{1}{2} e^{-\frac{t}{2 T_1}} \right) - \frac{E}{R_1} \frac{1}{2} e^{-\frac{t}{2 T_1}} = \frac{E}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{2 T_1}} \right)$$

C'est-à-dire que l'accroissement est plus lent que dans le cas de secondaire ouvert et tout se passe comme si L était doublé.

On peut se représenter ceci physiquement comme suit :

Au début le flux, partant d'une valeur nulle, croît plus ou moins vite. La variation de flux produit dans les deux enroulements une f.é.m. égale (dans le cas simplifié ci-dessus) et proportionnelle au taux de variation de ce flux (c'est-à-dire à la tangente).

Dans le primaire il y a donc deux f.é.m. à considérer : l'une, dont la valeur E est constante, l'autre variable avec le flux. Le courant du primaire dépend de ces deux f.é.m. Dans le secondaire, il n'y a lieu de tenir compte que de la f.é.m. variable produite par le flux ; le courant est proportionnel à cette f.é.m. D'autre part, le courant initial du secondaire doit être égal et opposé au courant initial du primaire,

pour que le flux initial soit nul. Par conséquent, le courant dans le primaire doit avoir une valeur initiale égale à la moitié du courant permanent $\frac{E}{R_1}$. Ce courant croît ensuite plus lentement qu'en l'absence de secondaire. Le tout est représenté par la Fig. 14 où l'échelle des f.é.m., des courants et des flux est la même.

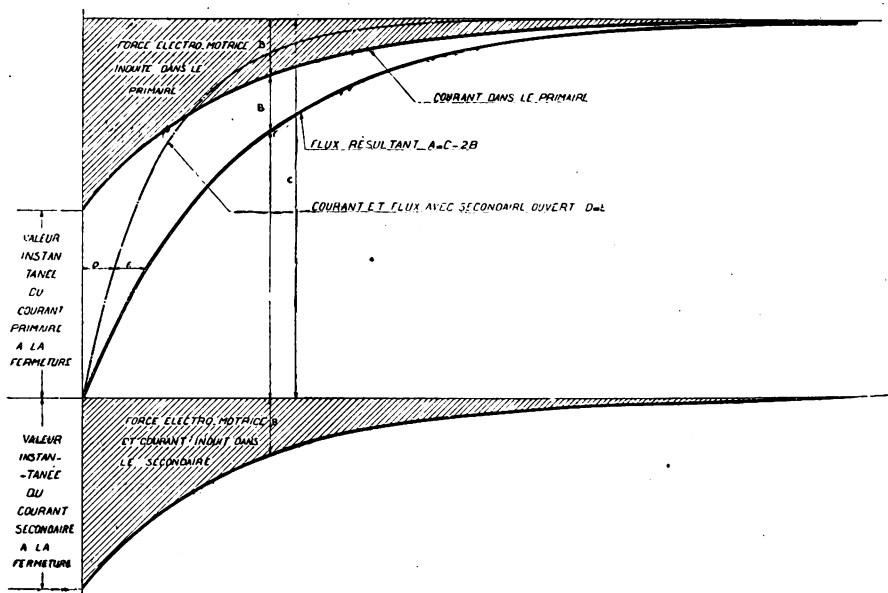


Fig. 14. — Courants et flux dans le cas d'un circuit secondaire.

On voit que le flux croît plus lentement que dans le cas où le secondaire est ouvert. Le courant primaire prend une valeur déterminée et pendant un certain temps reste supérieur au courant obtenu dans le cas du circuit secondaire ouvert.

L'adjonction d'un enroulement secondaire fournit ainsi un moyen simple d'augmenter le temps de fonctionnement. Il faut évidemment que T_2 soit le plus grand possible. La valeur maximum est obtenue par une spire de faible résistance (grosse section et grande conductibilité). On peut aussi enrouler du cuivre nu pour former une masse conductrice.

La fig. 15 montre quelques valeurs obtenues avec différentes épaisseurs d'enroulements de cuivre nu et des valeurs différentes d'ampère-tours finaux.

Dans le cas de cuivre isolé, il faut prendre un diamètre assez grand

pour obtenir l'effet maximum. On est libre dans ce cas de mettre cet enroulement en court-circuit ou non et cela au moment voulu. Un enroulement en court-circuit permet souvent de découpler le temps de fonctionnement.

La durée de la course de l'armature est aussi notablement augmentée. Les spires en court-circuit agissent surtout dans le voisinage près du noyau (résistance plus faible). Une masse de cuivre, placée près de la face polaire a un effet plus marqué qu'un enroulement ou un cylindre réparti sur tout le noyau.

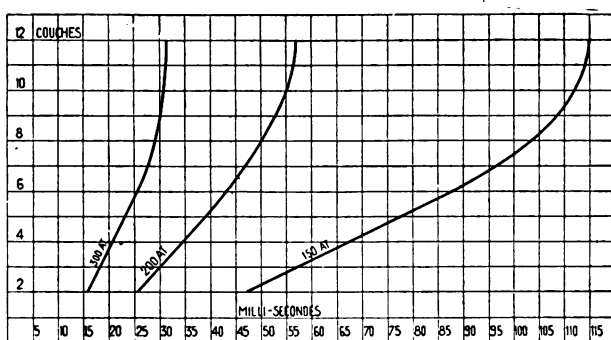


Fig. 15. — Temps de fonctionnement de relais E. munis de couches de fil de cuivre nu. pression 60 gr. entrefer : 0,05 mm. A. T. de fonct : 140.

L'action du relais peut être ralentie par des moyens extérieurs : bobine de self en série ou un shunt, de préférence non inductif ou possédant une certaine capacité. Avec $4\ \mu\text{F}$ on peut ainsi tripler la durée. Dans le cas d'un shunt il est nécessaire d'ajouter une résistance en série avec la batterie. L'effet est en général inférieur à celui obtenu par un enroulement en court-circuit.

Un shunt de grande self accélère l'opération. On peut réaliser toutes sortes de combinaisons, par exemple deux enroulements dont un en série et une self, et prévus de manière à ce que le nombre d'ampère-tours final soit le même pour les deux enroulements, on peut obtenir une opération momentanée lors de la fermeture et une seconde lors de l'ouverture du circuit.

Le cas d'un condensateur shunté placé en série est particulièrement intéressant et nous nous y arrêterons un peu plus longuement.

Cet arrangement a été particulièrement utilisé en télégraphie. On peut traiter le problème mathématiquement, mais il y a lieu d'être prudent et de tenir compte en premier lieu de ce que L est très va-

riable. Nous nous bornerons à dire que l'on peut obtenir des courbes d'établissement de courant dans le genre de celles de la fig. 16.

Il faut en général que L et R soient assez faibles, C et r assez grands pour obtenir l'effet maximum. La durée de fonctionnement d'un relais ordinaire, qui est par exemple de 8 ms, pourra avec ce dispositif être réduite à 4 ms, en utilisant une résistance de l'ordre de 1 000 ohms et un condensateur de l'ordre de 4 μ F. Le même résultat pourrait être obtenu sans condensateur shunté avec un relais comportant un nombre moindre de spires, mais un courant plus intense. Cette méthode est d'application difficile, car le relais dans ce cas absorbe plus d'énergie et s'échauffe dangereusement.

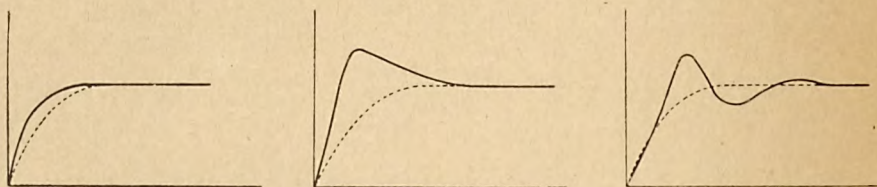
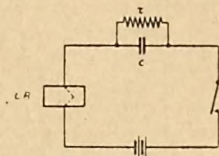


Fig. 16. — Types de courbes du courant avec condensateur shunté.

La résistance non inductive, shuntant le condensateur, est nécessaire pour maintenir le relais en position d'attraction. Dans certains cas, un fonctionnement momentané suffit et alors il peut être suffisant d'utiliser un condensateur sans shunt. Le relais doit alors opérer sur le courant de charge de ce condensateur.

Le condensateur shunté n'est pas souvent employé en téléphonie à cause du prix du condensateur. Un type spécial de relais donne souvent, à moins de frais, le résultat voulu.

4.6. Vitesse de Relâchement.

Pour un relâchement rapide il faut peu de magnétisme rémanent, pas de circuit électrique fermé dans le champ magnétique (pas de spires en court-circuit, un noyau feuilleté etc.) une forte pression sur le contact de repos et une faible inertie de l'armature.

Un relâchement lent peut être obtenu de diverses manières :

1° On peut court-circuiter le relais. Pour obtenir l'effet maximum il faut que la résistance de contact soit faible et que le relais lui-même ait une grande constante de temps, c'est-à-dire une résistance assez faible. Le relais devra être saturé autant que possible.

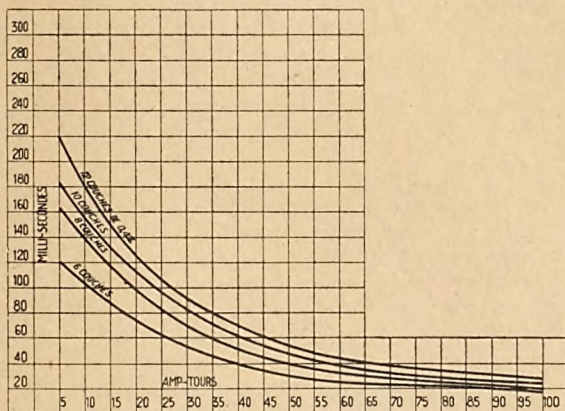


Fig. 17. — Temps de relâchement de relais E en fonction du nombre d'ampère-tours de relâchement et avec un nombre variable de couches de fil de cuivre nu.

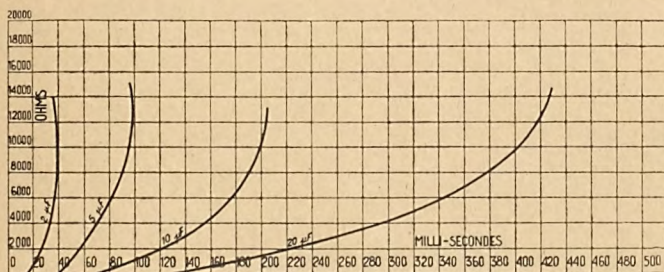


Fig. 18. — Temps de relâchement d'un relais E shunté par un condensateur en série avec une résistance variable.

2° On peut le munir d'un enroulement en court-circuit ou d'une masse de cuivre. Le dernier cas est parfois plus désavantageux que le premier. On peut par ce moyen décupler le temps de relâchement. Le nombre d'ampère-tours de relâchement devra être faible. Les courbes de la fig. 17 donnent une idée de l'influence d'un enroulement en fil de cuivre nu et le nombre d'ampère-tours de relâchement sur le temps de relâchement.

3° On peut shunter le relais. La plus grande durée est obtenue

avec un shunt non-inductif. Un shunt inductif peut accélérer ou retarder la vitesse de relâchement suivant que son coefficient de self est plus petit ou plus grand que celui du relais.

Un condensateur augmente la durée, mais il faut employer des grandes capacités. On peut avec une centaine de μF obtenir des durées de l'ordre de la seconde. Il faut en général une résistance assez élevée en série. Les courbes de la fig. 18 donnent quelques résultats obtenus en variant la capacité et la résistance en série.

4° On peut combiner un certain nombre des procédés énumérés ci-dessus. Les courbes de la fig. 19 donnent quelques temps de relâ-

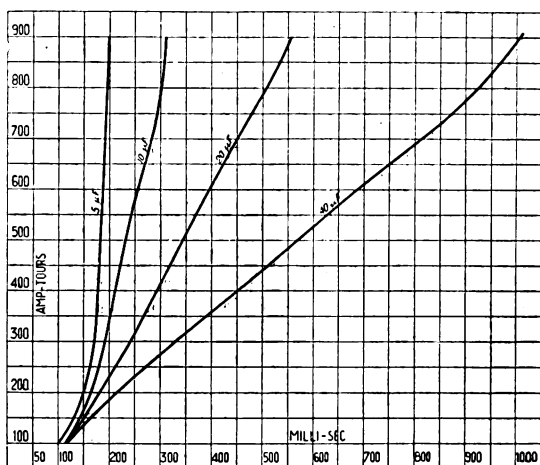


Fig. 19. — Temps de relâchement d'un relais E. avec 10 couches de fil de cuivre nu de 0,4 mm shunté par un condensateur en série avec une résistance de 12 000 ohms en fonction des ampères-tours de saturation (relais de 6 000 tours $R=1\ 000$ ohms).

chement obtenus avec un enroulement en fil nu et un condensateur placé en parallèle (une résistance de 12 000 ohms est en série avec le condensateur). A première vue, il semble que l'on peut obtenir des temps très élevés, mais il faut remarquer que pour le relais considéré, l'échauffement ne permet pas de dépasser 400 ampère-tours environ, ce qui ne donne que 450 ms pour 40 μF . Avec un relais sans enroulement en cuivre nu on obtient un temps du même ordre, car l'on dispose d'un espace supérieur pour l'enroulement et l'on peut ainsi augmenter le nombre d'ampère-tours.

5° Sans dispositif extérieur, on peut augmenter le temps de relâchement en prenant le plus petit entrefer, la plus faible pression arrière

et le plus grand nombre d'ampère-tours possibles, tout en assurant le relâchement du relais.

6° Une armature de grande masse retarde également quelque peu le temps de relâchement.

Dans le cas où l'on veut au contraire un relâchement facile on évitera tout courant induit (noyau divisé) et on utilisera l'acier au silicium qui possède une rémanence moindre.

4.7. *Fonctionnement des relais à courant alternatif.*

Dans certains cas, un relais doit fonctionner en courant alternatif. Nous distinguerons deux cas :

1. — Le courant alternatif est de basse fréquence (aux environs de 20 p:s).

2. — Le courant alternatif est d'une fréquence moyenne, c'est-à-dire 100 à 1 000 p:s.

Le premier cas se présente par exemple pour les relais qui doivent fonctionner sous l'influence du courant d'appel des centraux téléphoniques.

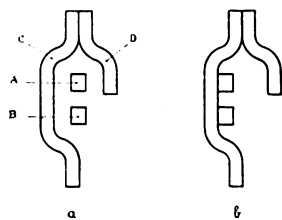


Figure 20. — Relais J avec appendice.

On peut utiliser un relais ayant une armature assez lourde, de manière à éviter les vibrations dans la mesure du possible, et à obtenir ainsi un contact stable. Il est cependant préférable de réaliser une attraction plus uniforme ; ce résultat peut être obtenu en couplant ensemble deux relais dont les courants sont décalés de 90°, soit en utilisant un relais spécial produisant une combinaison de deux champs magnétiques décalés. Dans le relais du type J de relais, l'extrémité du noyau est divisée en deux parties, dont l'une est entourée d'une bande de cuivre qui retarde le flux dans cette branche. L'armature est ainsi soumise à deux champs magnétiques décalés et on obtient une attraction assez uniforme.

On a perfectionné ce système en ajoutant à l'armature un appendice qui rend le relais insensible aux courants de courte durée. La figure 20 montre un relais de ce genre vu de face. B est la partie du noyau entourée de cuivre, C est l'armature et D l'appendice.

Si un courant de courte durée traverse l'enroulement, A seul laisse passer le flux. Celui-ci reste sans effet car les attractions sur l'armature et sur l'appendice se neutralisent à peu près.

En courant alternatif, le relais opère dès que le flux traverse B. L'armature occupe alors la position de la figure b, c'est-à-dire que l'entrefer entre A et l'armature est très petit, par contre il est très grand entre A et l'appendice. Le flux de A agit donc à peu près comme si l'appendice n'existait pas. Celui-ci intervient donc seulement dans le cas de courtes impulsions de courant.

Pour la transmission des impulsions à distance relativement grande en téléphonie automatique, un des systèmes utilisés fonctionne à la fréquence de 50. Le relais qui reçoit ce courant contient deux bobines dont les courants sont décalés d'environ 90°, à l'aide de condensateurs. Ces enroulements agissent sur deux circuits magnétiques. L'armature commune est ainsi soumise à une attraction assez uniforme.

Dans le cas de fréquences élevées, on accorde souvent le relais pour la fréquence en question, par exemple 133 ou 500 périodes par seconde.

Les contacts peuvent être disposés de deux manières ; ou bien le contact est ouvert au repos, et fermé par intermittence à la fréquence reçue, ou bien le contact est fermé au repos et plus ou moins ouvert, à la fréquence reçue. On adopte cette dernière solution quand on ne dispose que d'une énergie assez faible, c'est-à-dire de l'ordre de celle des courants de la voix

Pour les relais à courant alternatif, la densité du flux dans le fer doit être assez réduite pour éviter des pertes importantes. On doit spécialement veiller à l'isolement des fils pour éviter des courts-circuits entre spires, qui augmentent le courant tout en diminuant l'effet sur l'armature

4.8. Effet des Relais sur les Circuits de Conversation.

Certains relais sont en série et d'autres en dérivation sur un circuit de conversation. Il est essentiel que l'atténuation ait une valeur aussi faible que possible. Si l'impédance d'un relais en série est Z_s , il provoque une perte de :

$$20 \log_{10} \left(1 + \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2) Z_s} \right) \text{ décibels}$$

quand il est placé entre deux impédances Z_1 et Z_2 .

Un relais Z_d en dérivation donne une perte de :

$$20 \log_{10} \left(\frac{Z_1 + Z_2 + Z_d}{Z_1 + Z_2} \right) \text{ décibels}$$

Ces pertes sont généralement réduites à quelques dixièmes de décibel ou même à quelques centièmes. Dans ce but, les relais en série sont généralement shuntés par une résistance ou un condensateur. Les relais en dérivation ont souvent un noyau renforcé par des lamelles d'acier au silicium pour augmenter la surface utile du flux magnétique, donc l'impédance. Il est important dans ce cas d'éviter les spires en court-circuit. 2 pour 100 de ces spires réduisent facilement l'impédance de moitié. Lors de la fabrication, on fait un essai spécial dans ce sens.

Les circuits de transmission doivent autant que possible être équilibrés par rapport à la terre. Certains relais en dérivation devront donc être munis de deux enroulements identiques ; on peut aussi utiliser deux relais identiques. Il peut même être nécessaire d'équilibrer spécialement ces relais. Si le déséquilibre est trop grand, il en résulte souvent du bruit sur la ligne du fait de courants de circulation inégaux dans les deux fils.

5. — CONCLUSION

L'étude des relais électromagnétiques utilisés en téléphonie, bien que simple en apparence a cependant soulevé des problèmes assez complexes.

Lors de l'établissement ou de l'ouverture du courant il y a lieu de tenir compte de l'induction dans les masses conductrices, de l'entrefer et de la perméabilité variables. La propagation du champ magnétique de la périphérie vers le centre du noyau est intéressante et utile à examiner. L'étude du mouvement de l'armature et des vibrations des contacts s'impose. Les phénomènes électriques dans les circuits comportant le relais et les appareils auxiliaires tels que condensateurs, selfs et résistances doivent être examinés ainsi que les phénomènes de contact : arc, décharge dans l'air et vapeurs ionisées. A signaler aussi les problèmes d'atténuation des courants téléphoniques, d'échauffement, etc., l'étude des isolants, de leurs qualités électriques et chimiques. Enfin il y a lieu de résoudre les problèmes d'ordre économique dans lesquels il faut considérer le prix des matières premières, la main-d'œuvre, le poids, la consommation de courant, l'espace occupé, le temps de service effectif, l'ajustage, l'entretien, etc.

APPLICATION DES LOIS DE L'INCANDESCENCE AU CALCUL DES FILAMENTS DE LAMPES ÉLECTRIQUES ⁽¹⁾

par M. TRANCHECOSTE

Directeur technique de « La Lampe Stella ».

Dans cette étude du calcul des filaments, je diviserai les lampes à incandescence en 4 catégories de difficulté croissante :

- 1° Les lampes à filament rectiligne dans le vide ;
- 2° Les lampes à filament boudiné dans le vide ;
- 3° Les lampes à filament rectiligne dans une atmosphère gazeuse (sans intérêt pratique) ;
- 4° Les lampes à filament boudiné dans une atmosphère gaz.

1° LAMPES A FILAMENT RECTILIGNE DANS LE VIDE

Cas du Corps Noir

Envisageant d'abord le cas du corps noir, rappelons que la puissance émise par unité de surface ou encore la radiance énergétique ou totale est proportionnelle à la puissance 4 de la température absolue $T = t + 273$. C'est la loi de Stefan. Un fil cylindrique ou un tube de longueur l et de diamètre d dans lequel on dépense une puissance W atteint donc une température absolue telle que

$$W = \pi l d \times \sigma T^4 = \sigma \pi l d T^4$$

d'autant plus élevée que la puissance fournie est importante.

Yves a donné la valeur suivante de σ

$$\sigma = 5,71 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2\text{-degré}^4 = 5,71 \times 10^{-5} \text{ erg/sec.-cm}^2\text{-degré}^4.$$

Au point de vue lumineux, on sait que l'on caractérise l'état des surfaces à haute température par la brillance ; c'est-à-dire par l'intensité lumineuse émise par unité de surface projetée perpendiculairement à la direction que l'on envisage. Comme l'impression lumi-

(1) Communication présentée à la séance du 4 mars 1930 de la 2^e Section de la Société Française des Electriciens.

neuse dépend de l'éclairement produit sur la rétine par le flux lumineux passant par la pupille, on montre que l'impression lumineuse dépend de la brillance ainsi définie.

Pratiquement l'intensité lumineuse émise par un élément plan d'un corps noir est maximum suivant la normale et a pour valeur J . Dans une direction faisant l'angle α avec la normale, l'intensité est $J \cos \alpha$. C'est la loi de Lambert. Dans ces conditions, la brillance d'une petite surface plane s suivant une direction faisant l'angle α avec la normale est

$$\frac{J \cos \alpha}{s \cos \alpha} = \frac{J}{s}$$

c'est-à-dire que la brillance est indépendante de la direction α .

Il s'ensuit qu'un fil cylindrique se comporte à ce point de vue comme s'il était plan. La brillance du milieu du filament est la même que celle des bords. Donc l'intensité lumineuse est

$$J = \mathcal{B} l d \quad \mathcal{B} \text{ étant la brillance}$$

alors que le flux lumineux est

$$\Phi = \pi \mathcal{B} l d.$$

Comme la brillance ne dépend que de la température, la consommation spécifique en watts par bougie

$$\frac{W}{J} = \frac{\pi \mathcal{R}}{\mathcal{B}}$$

et l'efficacité lumineuse en lumens par watt

$$\frac{\Phi}{W} = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{R}}$$

ne dépendent que de la température.

D'autre part, la brillance croît plus rapidement que la radiance totale, de sorte que l'efficacité lumineuse croît avec la température.

On trouve dans le livre de photométrie de M. Fabry la formule empirique suivante pour représenter la brillance en bougies par centimètres carrés :

$$\log \mathcal{B} = 7,184 - 1,144 \frac{10^4}{T} + 0,00736 \left(\frac{10^4}{T} \right)^2.$$

$\mathcal{B}$ étant exprimé en bougies par cm^2 .

TABLEAU I

Température absolue	Pouvoir ém. lumin.	Pouvoir ém. Total	Résistivité	Brillance normale	$\frac{d\beta_n}{dR} : \frac{dT}{T}$	Radiance totale	$\frac{d\beta_n}{dR} : \frac{dT}{T}$	Efficacité lumineuse	Vitesse d'évaporation gr/cm ² -sec.
300		0,032	5,64			0,0015			
400		0,012	8,06			0,006			
500		0,053	10,74			0,019			
600		0,064	13,54			0,048			
700		0,076	16,45			0,105			
800		0,088	19,47			0,206			
900		0,101	22,6			0,379			
1000	0,464	0,114	25,7	0,0012	22,	0,654	5,35		
1100	0,463	0,128	28,85	0,0010	24,	1,072	5,35		
1200	0,462	0,143	32,02	0,006	20,	1,691	5,35		
1300	0,460	0,158	35,24	0,0029	18,6	2,58	5,35		
1400	0,459	0,175	38,52	0,11	17,2	3,82	5,29	0,09	
1500	0,457	0,192	41,85	0,33	16,4	5,55	5,23	0,20	
1600	0,456	0,207	45,22	0,92	15,2	7,77	5,15	0,40	
1700	0,455	0,222	48,6	2,26	14,4	10,60	5,07	0,71	
1800	0,454	0,236	52,08	5,05	13,7	14,2	5,	1,16	3,4.10 ⁻¹⁵
1900	0,453	0,249	55,6	10,4	13,	18,5	5,	1,88	88.10 ⁻¹⁵
2000	0,452	0,260	59,4	20,	12,3	23,7	4,85	2,78	0,96.10 ⁻¹¹
2100	0,450	0,270	62,65	35,6	11,7	29,8	4,8	3,95	8,5.10 ⁻¹²
2200	0,449	0,279	66,2	61,3	11,2	37,2	4,74	5,47	65.10 ⁻¹²
2300	0,448	0,288	69,9	100,5	10,8	45,9	4,7	7,25	39,5.10 ⁻¹¹
2400	0,447	0,296	73,5	157,	10,3	55,8	4,64	9,37	12,15.10 ⁻⁹
2500	0,446	0,303	77,2	237,5	9,9	67,6	4,59	14,7	43.10 ⁻⁹
2600	0,444	0,311	81,	347,	9,6	80,8	4,55	17,3	16.10 ⁻⁸
2700	0,443	0,318	84,7	498,	9,2	96,2	4,51	20,4	0,54.10 ⁻⁶
2800	0,442	0,323	88,5	694,	8,9	113,0	4,47	23,8	1,72.10 ⁻⁶
2900	0,441	0,329	92,3	950,	8,6	132,	4,43	27,1	
3000-	0,440	0,334	96,2	1257,	8,3	154,	4,4	31,	
3100	0,438	0,337	100,	1647,	8,	177,	4,37	34,	
3200	0,437	0,341	104,	2110,	7,8	203,	4,34	34,6	
3300	0,436	0,344	108,	2690,	7,7	232,	4,31	38,5	
3400	0,435	0,348	112,	3370,	7,6	264,	4,29	42,6	
3500	0,434	0,351	116,	4220,	7,4	300,	4,27	46,	
3600	0,413	0,354	122,	5740,	7,3	360,		53,	

Cas du Tungstène

Les corps réels suivent plus ou moins la loi de Stefan. Forsythe et Worthing ont donné, dans l'*Astrophysical Journal* et au Congrès international de l'éclairage en 1925 un tableau résumant les résultats expérimentaux qu'ils ont obtenus avec le tungstène. Ces résultats sont consignés dans le tableau 1 qui a été tiré de l'ouvrage de M. Ribaud sur le rayonnement des corps non noirs.

Comparativement aux corps noirs, le pouvoir émissif est bien entendu inférieur à 1. D'après la loi de Kirchhoff il est égal au pouvoir absorbant. J'utiliserai cette remarque dans l'étude du filament boudiné dans le vide.

Ceci posé, faisant intervenir la loi de Joule, on obtient la relation

$$W = \rho \frac{l}{s} I^2 = \rho \frac{4l}{\pi d^2} I^2 = \pi l d \mathcal{R}$$

d'où

$$d^3 = \frac{4\rho}{\pi^2 \mathcal{R}} I^2$$

pour une température donnée on a

$$d^3 = a(T) I^2 \text{ en posant } a = \frac{4\rho}{\pi^2 \mathcal{R}}$$

ρ et $\mathcal{R}$ étant uniquement fonctions de T .

Forsythe et Worthing déduisent de leurs essais que pour le tungstène entre les températures de 1 000 à 3 655 K (fusion) et a fortiori dans la zone des températures des filaments de lampes (de 2 400 à 3 000)

$$\rho = m T^{1,2}$$

d'où

$$d^3 = \frac{4m T^{1,2}}{\pi^2 \mathcal{R}} I^2$$

La relation de Joule sous la forme

$$\frac{U^2 s}{\rho l} = \pi l d \mathcal{R}$$

donne

$$l = \frac{\pi}{4\rho} \sqrt{a} \times U \sqrt{d} = \sqrt{\frac{1}{4\rho \mathcal{R}}} U \sqrt{d} = b(T) U \sqrt{d}$$

en posant

$$b = \sqrt{\frac{1}{4\rho \mathcal{R}}} = \frac{\pi}{4\rho} \sqrt{a}$$

ou encore

$$l = \frac{\pi}{4\rho} a^{2/3} \times UI^{1/3} \\ = c UI^{1/3}$$

en posant

$$c = \frac{\pi}{4\rho} a^{2/3} = \frac{1}{\sqrt[3]{4\pi\rho R^2}}.$$

Ces formules conviennent pour un corps cylindrique quelconque, noir ou non. Cependant si le tungstène rayonnait comme un corps noir on aurait en appelant $\mathcal{R}_n$ la puissance rayonnée par unité de surface

$$W = \pi l d \mathcal{R}_n.$$

Au lieu de cela, il faut faire intervenir dans la formule ci-dessus le rayonnement $\mathcal{R} = e \mathcal{R}_n$, e étant le pouvoir émissif du tungstène indiqué dans le tableau 1.

En fonction de la température on aurait, si le tungstène suivait les propriétés rayonnantes du corps noir

$$a = \frac{4m}{\sigma\pi^2 T^{2,8}} \quad b = \sqrt{\frac{1}{4\sigma\rho T^4}} = \sqrt{\frac{1}{4\sigma m T^{5,2}}} \\ c = \left(\frac{1}{4\pi\sigma^2\rho T^8}\right)^{1/3} = \frac{1}{\sqrt[3]{4\pi\sigma^2 m T^{9,2}}}.$$

En réalité, au lieu de la loi de Stefan

$$W = \sigma\pi l d T^4$$

on a approximativement

$$W = K\pi l d T^{4,4 \text{ à } 4,6} \text{ suivant la température}$$

d'où

$$a = \frac{4m}{K\pi^2 T^{3,2 \text{ à } 3,4}} \\ b = \sqrt{\frac{1}{4Km T^{5,6 \text{ à } 5,8}}} \quad c = \sqrt[3]{\frac{1}{4\pi K^2 m T^{9,0 \text{ à } 10,4}}}.$$

Les constantes a et c varient à peu près de la même façon quand la température varie ; c'est-à-dire inversement à la puissance 3,25 à 3,45 de T .

Telles sont les formules qui permettent le calcul des lampes à filament rectiligne, c'est-à-dire l'établissement de la longueur de fil et

du diamètre nécessaires pour obtenir sous une tension et pour une puissance données un flux lumineux déterminé.

Mais le tungstène ne suit pas la loi de Lambert. La brillance passe par un maximum supérieur de 16 pour 100 à la brillance normale pour $\alpha = 75^\circ$; puis s'annule pour $\alpha = 90^\circ$.

Il en résulte que le filament cylindrique ne présente pas, comme une bande plate, une brillance constante en tout point : la brillance est plus élevée sur les bords. En pratique on retiendra que la brillance moyenne d'un fil cylindrique est de 5 pour 100 supérieure à celle d'une bande plate ; les chiffres α_n sont donc à majorer de 5 pour 100 pour avoir la brillance.

2° LAMPES A FILAMENT BOUDINÉ DANS LE VIDE

Le phénomène est singulièrement plus complexe lorsqu'au lieu du fil rectiligne on place dans l'ampoule dans laquelle on a fait le vide un fil enroulé en hélice. Une partie du rayonnement émis par chacune des spires est intercepté par les autres spires. Deux hypothèses sont à étudier :

Cas du Corps Noir

Le rayonnement intercepté est intégralement absorbé. Cette absorption a pour effet d'élever la température du filament de sorte que, à courant égal, un fil enroulé en hélice est à une température plus élevée que le même fil rectiligne. Pour atteindre la même température, c'est-à-dire la même durée, on devra diminuer l'intensité de courant. Nous allons voir dans quelle proportion.

Il est bien évident que les parties du filament qui reçoivent le rayonnement des spires voisines ont tendance à atteindre une température plus élevée que la portion qui se trouve à l'extérieur du boudin. Mais par contre, par suite de la conductibilité calorifique du filament, la température tend à s'égaliser en tout point de la surface à une valeur moyenne. Si la matière du filament n'est pas parfaitement conductrice de la chaleur, il y a là une circonstance défavorable au point de vue de l'efficacité lumineuse du filament boudiné. En effet, les parties du boudin visibles de l'extérieur sont précisément celles qui sont à la température minimum ou autrement dit, celles dont la brillance est de beaucoup la plus faible.

Autre circonstance fâcheuse, ce sera la température maximum, qui aura le moins d'influence lumineuse utile, qui déterminera la vie de la lampe, à cause de la désagrégation du filament au point le plus chaud. Or, la vitesse de désagrégation croît très rapidement quand la température augmente.

Nous considérerons, pour simplifier, le cas du corps noir à grande conductibilité calorifique et admettrons que la température est sensiblement constante en tout point de la surface du filament.

Soit une spire incandescente représentée sur la figure 1. Par raison de symétrie, le flux d'énergie aussi bien que le flux lumineux émis par la portion de tore correspondant à l'angle $d\alpha$ s'échappe ra-

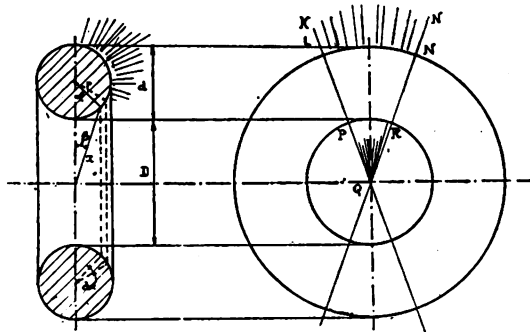


Figure 1.

dialement. Sur la vue en élévation il est conservatif entre les directions LK et MN vers l'extérieur et entre les directions PQ et QR vers l'intérieur de l'hélice.

Ceci posé, le flux émis suivant la direction α dans un angle $d\alpha$ pour la spire entière est

$$dW = R \cdot 2\pi (x \cos \beta) \cdot r d\alpha$$

$\mathcal{R}$ étant la radiance énergétique si W est le flux d'énergie. Le flux lumineux se comporte exactement de la même manière. Si $\mathcal{R}$ représentait la radiance lumineuse dW représenterait le flux lumineux élémentaire. Comme

$$x \cos \beta = R + r - r \cos \alpha$$

il vient

$$dW = 2\pi r \mathcal{R} (R + r - r \cos \alpha) d\alpha.$$

Le flux correspondant à un angle fini $\Delta\alpha$ est, en intégrant

$$\Delta W = 2\pi r \mathcal{R} [(R + r) \Delta\alpha - r \Delta \sin \alpha]. \quad (1)$$

Le deuxième terme représente la correction à faire quand le diamètre du mandrin $D=2R$ sur lequel la spire a été formée n'est pas très grand devant le diamètre $d=2r$ du filament.

Le flux total émis est, en intégrant, de 0 à 2π

$$W = 2\pi r \mathcal{A} \cdot 2\pi (R + r). \quad (2)$$

Il est rigoureusement proportionnel au diamètre moyen de la spire quelles que soient les valeurs relatives de D et de d .

Rappelons que l'on suppose que la température et par conséquent la radiance, ne dépend pas de l'angle α .

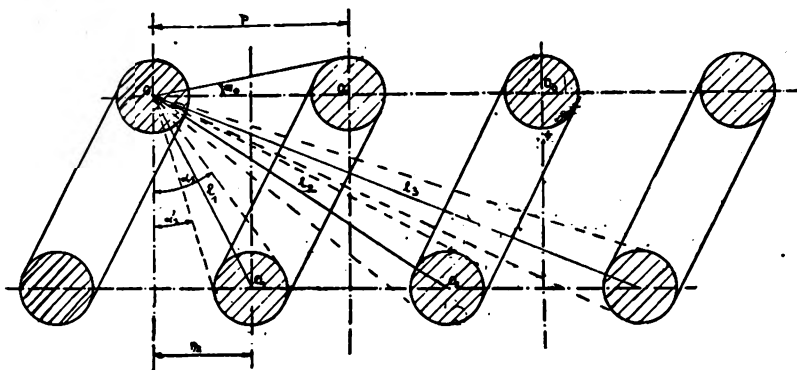


Figure 2.

En réalité le fil présente l'aspect d'une hélice dont on voit la coupe sur la figure 2. Bien entendu, la longueur d'une spire est

$$\sqrt{p^2 + \pi^2 (D + d)^2}$$

et non plus

$$\pi (D + d).$$

En pratique l'hélice étant à pas p assez faible (p est compris entre 1, 4 d et 2 d) nous n'en tiendrons pas compte.

Au point de vue du terme correctif $\Delta \sin \alpha$ la question se pose de savoir si l'on doit compter les angles α à partir de 00_1 ou de OX . Nous prendrons pour origine OX en remarquant que la surface émettrice est la même, à l'allongement près, dans le cas de la figure 1 que dans celui de la figure 2, le passage de l'une à l'autre se faisant uniquement par torsion du filament sur lui-même. D'ailleurs il ne s'agit que d'un terme correctif. Au surplus, le pas est pratiquement faible.

Le flux émis par unité de longueur de la spire de section O et in-

tercepté par la portion diamétralement opposée O_1 de la spire, est ainsi

$$\begin{aligned}\frac{\Delta W_1}{2\pi(R+r)} &= 2\pi r \mathcal{R} \left[\frac{\alpha_1 - \alpha'_1}{2\pi} - \frac{r}{R+r} \frac{(\sin \alpha_1 - \sin \alpha'_1)}{2\pi} \right] \\ &= 2\pi r \mathcal{R} \left[\frac{2 \arcsin \frac{r}{l_1}}{2\pi} - \frac{r}{2\pi(R+r)} (\sin \alpha_1 - \sin \alpha'_1) \right]\end{aligned}$$

l_1 étant la distance 00_1 des centres des sections.

La coupe de la figure 1 par le plan diamétral KQ présente le même aspect qu'une coupe par le plan NQ c'est-à-dire que tous les éléments de la longueur d'une spire se trouvent dans la même position par rapport aux éléments diamétralement opposés des autres portions du bobinage.

Nous pouvons donc écrire que le flux intercepté par la spire 00_1 par la spire suivante 0_00_2 est

$$\Delta W_1 = 2\pi r \mathcal{R} \left[(R+r) 2 \arcsin \frac{r}{l_1} - r (\sin \alpha_1 - \sin \alpha'_1) \right].$$

La figure 2 montre que le flux total intercepté par toutes les spires, est la somme de termes analogues au précédent, mais dans lesquels au lieu de

$$l_1 = \sqrt{(D+d)^2 + \left(\frac{p}{2}\right)^2}$$

pour la section 1, figureront respectivement des distances

$$l_2 = \sqrt{(D+d)^2 + \left(\frac{3p}{2}\right)^2} \text{ pour la section } O_2$$

$$l_3 = \sqrt{(D+d)^2 + \left(\frac{5p}{2}\right)^2} \text{ pour la section } O_3$$

A partir d'une certaine section p dont le numéro dépendra des caractéristiques du bobinage, tout le flux compris dans l'angle

$$\Delta \alpha = \alpha_0 - \alpha'_p$$

sera intercepté par les spires éloignées du bobinage supposé de grande longueur.

On calculera

$$\alpha_0 = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{r}{p}$$

$$\alpha'_p = \arcsin \frac{\frac{e}{2} + (p-1)e}{D+d} - \arcsin \frac{r}{l_p}$$

avec

$$lp = \sqrt{(D + d)^2 + \left[\frac{e}{2} + (p - 1)e \right]^2}$$

ou bien on mesurera simplement les angles sur un dessin à grande échelle.

Le flux total intercepté $\Sigma \Delta W_i$ correspondra à la somme $\Sigma \Delta \alpha_i$ de

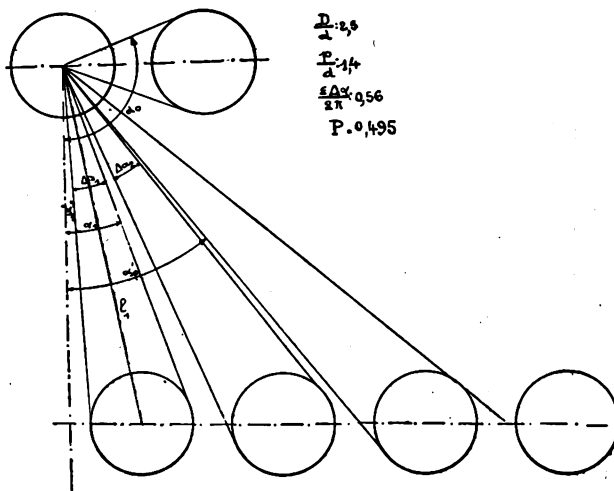


Figure 3.

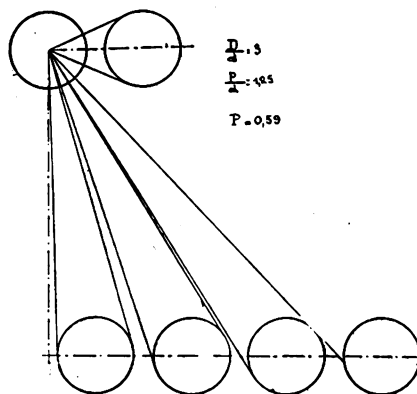


Figure 3 bis

tous les angles interceptés à droite et à gauche de la spire considérée, de sorte que le rapport que nous appellerons P du flux intercepté au flux total émis donné par la formule 1 aura pour expression

$$P = \frac{W_{\text{intercepté}}}{W_{\text{émis}}} = \frac{\Sigma \Delta W_i}{W_c} = \frac{1}{2\pi} \left(\Sigma \Delta \alpha - \frac{d}{D + d} \Sigma \Delta \sin \alpha \right)$$

le deuxième terme représentant le terme correctif.

Les figures 3 et 3 bis représentent deux exemples de boudins comportant des caractéristiques de bobinage différentes. On trouvera les valeurs de P consignées au tableau II.

TABLEAU II

$\frac{p}{d}$	$\frac{D}{d}$	$P = \frac{W_i}{W_j}$	Hypothèse du corps noir $\frac{W_j \text{ boudiné}}{W_j \text{ rectiligne}} = 1 - P.$
1,4	1,5	0,47	0,53
»	2	0,485	0,515
»	2,5	0,495	0,505
»	3	0,50	0,50
»	4	0,515	0,485
»	5	0,525	0,475
2	3	0,405	0,595
1,75	»	0,44	0,56
1,5	»	0,485	0,515
1,4	»	0,50	0,50
1,25	»	0,54	0,46
1	1,5	0,60	0,30 / cas théorique
1	∞	0,67	0,33 / extrême

Ces watts absorbés concourent avec l'effet Joule à augmenter la température du filament. Donc si l'on compare à température égale, un fil rectiligne et le même fil boudiné, le premier émettra un flux d'énergie W_e égal à la puissance dépensée par effet Joule. Pour la même température, on dépensera seulement par effet Joule dans le fil boudiné

$$W'_j = W_e - W_a$$

W_a représentant la puissance absorbée, c'est-à-dire W_i dans le cas du corps noir d'où

$$\frac{W_j}{W'_j} = \frac{W_e}{W'_j} = 1 + \frac{W_i}{W_j} = \frac{W_e}{W_e - W_i} = \frac{1}{1 - P}.$$

Par conséquent, pour atteindre la même température un fil boudiné absorbera moins d'énergie que le même fil rectiligne, c'est-à-dire qu'il lui suffira d'une intensité plus faible.

Est-ce à dire qu'il y ait un gain quelconque au point de vue de l'efficacité lumineuse ?

Non, car les corps noirs absorbant intégralement les radiations lumineuses aussi bien que toutes les autres, le flux lumineux émis sera absorbé dans la même proportion que le flux d'énergie. L'efficacité lumineuse restera la même.

Cas du fil de tungstène

Ces conclusions, si elles sont exactes qualitativement en ce qui concerne l'augmentation du diamètre pour un même courant, sont nettement en désaccord en ce qui concerne l'efficacité lumineuse avec ce qu'on observe pour le filament de tungstène. Il est de notoriété publique en effet que le rendement d'une lampe à fil boudiné dans le vide est, toutes choses égales, de beaucoup inférieur à celui de la lampe à filament rectiligne, quoique le fil boudiné constitue en somme une enceinte semi-fermée.

Néanmoins nous nous servirons des résultats trouvés pour le corps noir pour l'étude du cas réel du filament de tungstène

Ces propriétés s'expliquent fort bien en se reportant au tableau I où l'on voit que le rayonnement du tungstène est tout à fait sélectif ; vers la température de 2.500 K le pouvoir émetteur du tungstène, qui est égal à son pouvoir absorbant, est 0,45 pour les radiations lumineuses, alors que pour l'ensemble des radiations émises à cette température, le pouvoir absorbant est seulement de 0,3.

Ainsi le fil boudiné de tungstène réfléchit la moitié du flux lumineux intercepté alors qu'il n'absorbe qu'un tiers environ du flux d'énergie, autrement dit il économise un tiers de la dépense d'énergie électrique mais il absorbe la moitié du flux lumineux.

D'une façon plus précise, nous distinguerons d'une part le flux émis W_e , d'autre part les flux interceptés W_i et les flux absorbés W_a qui sont reliés par

$$W_a = a W_i$$

a étant le pouvoir absorbant.

Nous étudierons les flux d'énergie mais tout ce que nous en dirons s'appliquera également aux flux lumineux. Le coefficient d'absorption seul changera de valeur.

Le flux émis qui est dû à l'effet Joule est intercepté partiellement une première fois suivant la théorie précédente.

$$P = \frac{W_i i}{W_e} = \frac{W_i i}{W_j}$$

L'indice 1 de $W_i i$ indique ici qu'il s'agit du flux intercepté la première fois.

Mais la quantité absorbée est seulement

$$W_a a = a W_i i.$$

La fraction $(1-a) W_1$ constitue le flux réfléchi : nous l'appellerons W_2e pour indiquer qu'il est réémis après réflexion. Une partie de ce flux réfléchi W_2e sort du bobinage entre les spires (ce qui est dommage s'il s'agit du flux d'énergie global et ce qui est tant mieux en ce qui concerne le flux lumineux utile).

Quoi qu'il en soit, nous appellerons K le rapport

$$K = \frac{W_2i}{W_2e}$$

du flux intercepté après la première réflexion au flux émis après la première réflexion également. Nous supposerons pour l'instant K connu et nous montrerons plus loin comment on peut tenter de le calculer.

Avec les notations précédentes, on a donc pour les flux en jeu après la première réflexion, les relations

$$\begin{aligned} W_2e &= (1-a) W_1i \\ W_1i &= KW_2e = K(1-a) W_1i \\ W_2a &= a W_2i = Ka(1-a) W_1i. \end{aligned}$$

Après la deuxième réflexion on a de même

$$\begin{aligned} W_3e &= (1-a) W_2i \\ W_2i &= KW_3e = [K(1-a)]^2 W_1i \\ W_3a &= a W_3i = Ka W_3e = a(1-a) KW_2i = a[(1-a)K]^2 W_1i \end{aligned}$$

K est sensiblement le même que précédemment.

et après la $(n-1)^{\circ}$ réflexion

$$W_{na} = a[(1-a)K]^{n-1} W_1i$$

etc...

Le fil boudiné consomme seulement une puissance Joule.

$$\begin{aligned} W'_J = W_e - \Sigma W_a &= W_J - \Sigma W_a \quad \text{avec} \quad \Sigma W_a = W_{1a} + W_{2a} + \dots \\ &= a W_1i [1 + K(1-a) + [K(1-a)^2] + \dots]. \end{aligned}$$

La somme de la progression géométrique de premier terme 1 et de raison $K(1-a) < 1$ qui constitue une série est

$$\frac{1}{1 - K[1-a]}$$

d'où

$$\frac{W'_J}{W_J} = 1 - \frac{aP}{1 - K(1-a)}.$$

L'efficacité lumineuse est, par rapport à celle du fil rectiligne..

$$\frac{\Phi'_b}{\Phi_r} : \frac{W'_J}{W_J} = \frac{1 - \frac{a_l P}{1 - K(1-a_l)}}{1 - \frac{a_r P}{1 - K(1-a_r)}}.$$

at est le coefficient d'absorption global ; al est le coefficient d'absorption pour les radiations lumineuses.

Elle ne dépend plus seulement de la température comme pour le fil rectiligne, mais elle dépend de T et des caractéristiques du boudinage.

Remarquons en passant que l'application de notre théorie au cas particulier $a=1$ nous fait retomber sur le résultat que l'efficacité lumineuse du corps noir boudiné est la même que celle du corps noir rectiligne.

L'efficacité lumineuse d'un fil boudiné et du fil rectiligne serait également la même si le rayonnement du corps incandescent n'était pas sélectif, c'est-à-dire si le pouvoir absorbant global était le même que le pouvoir absorbant moyen pour les radiations visibles. Le dia-

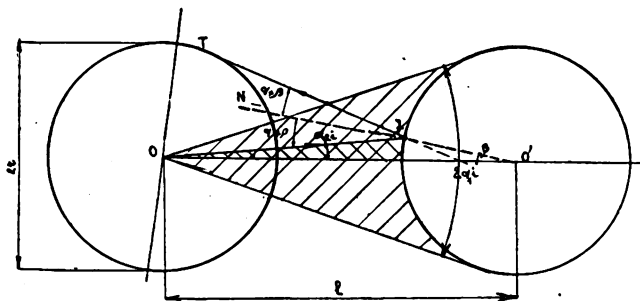


Figure 4.

mètre croîtrait par rapport au fil rectiligne d'autant plus que le pouvoir absorbant global serait grand.

Si l'on avait la chance que le pouvoir absorbant lumineux fût plus faible que le pouvoir absorbant global, le boudinage serait au contraire un moyen d'augmenter l'efficacité.

EVALUATION DU RAPPORT K DU FLUX INTERCEPTÉ W_{21} AU FLUX ÉMIS W_{2e}
APRÈS RÉFLEXION

Considérons (fig. 4) le cas simple d'une section émettrice O et d'une spire voisine O' ; nous avons calculé dans le cas du corps noir le rapport du flux intercepté par O' : W_{ii} au flux total. Il est égal, à la correction précédente près, au rapport de l'angle $\Sigma \Delta \alpha_{1,i}$ hachuré à 2π ; c'est ce que nous avons appelé P.

Il nous faut considérer maintenant le rapport K du flux W_{21} intercepté par O après réflexion sur O' au flux W_2^e émis par O' . C'est, tou-

jours à la correction près, le rapport de l'angle hachuré deux fois $\alpha_2 i$ à l'angle hachuré une seule fois α, i .

L'angle hachuré deux fois résulte simplement de la loi de la réflexion sur un miroir convexe O' . La seule complication tient au fait qu'on ne peut pas supposer le miroir O' à faible ouverture.

L'angle $\alpha_2 i$ que nous appellerons plus simplement dans ce qui suivra α est tel que le rayon qui le limite OI est réfléchi tangentiellement à la circonférence O , en IT ; l'angle OIN est égal à l'angle NIT et à $\alpha + \beta$ en appelant β l'angle $OO'N$.

Les calculs trigonométriques ne présentent aucune difficulté; on aboutit à

$$\left(\frac{r}{2l}\right)^2 = \sin^2 \beta - \left(\frac{l}{r}\right)^2 \frac{\sin^2 \beta}{\left[1 - \left(\frac{l}{r}\right)^2 - 2\frac{l}{r} \cos \beta\right]^2}.$$

Bien entendu, quand les angles sont assez petits pour qu'on puisse les assimiler aux sinus, c'est-à-dire dans le cas de spires éloignées l'une de l'autre, on a

$$\beta = \frac{r}{2l}; \text{ (la distance focale est la moitié du rayon)}$$

$$\alpha = \frac{r^2}{2l(l-r)}$$

on retrouve d'autre part la formule des miroirs convexes à faible ouverture

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{2}{r}.$$

Connaissant $\alpha_2 i$ on en déduira

$$K = \frac{\alpha_2 i}{\alpha_1 i}$$

ou en tenant compte de la correction s'il y a lieu

$$K = \frac{\alpha_2 i - \frac{d}{D+d} \Delta \sin}{\alpha_1 i - \frac{d}{D+d} \Delta \sin}.$$

Après la deuxième réflexion le flux intercepté une troisième fois correspond à un angle $\alpha_3 i$ de la section émettrice beaucoup plus petit que $\alpha_2 i$.

Dans le cas du boudin ou plus de deux cercles se trouvent en présence, il y a lieu de considérer deux sortes de flux réfléchis.

1° Les flux réfléchis par les divers cercles du boudin sur le cercle émetteur considéré ; c'est celui qu'on vient d'étudier.

2° Les flux réfléchis par les divers cercles sur des cercles autres que le cercle émetteur ou sur un groupe de cercles (fig. 5).

Cas particulier $l=l'$ alors $\alpha=2\beta$.

Le calcul donne pour l'angle α dont le rayon réfléchi correspondant passe par l'axe O''

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \gamma/2}{l/r - \cos \gamma/2},$$

α n'est plus l'angle cherché, c'est sa variation quand le rayon réfléchi

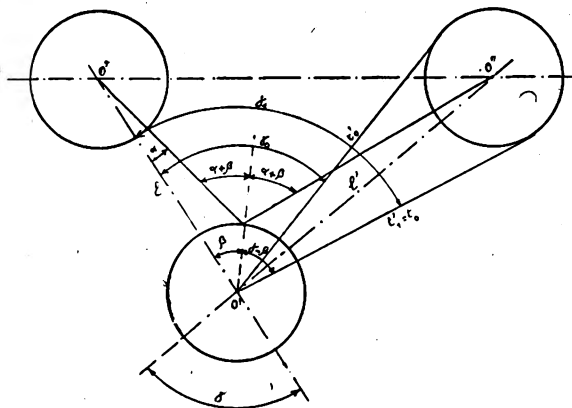


Figure 5.

passé de la position tangentielle supérieure à la position tangentielle inférieure qu'on cherche.

De même si les cercles sont assez éloignés l'un de l'autre pour que $t'=t_1$ l'

les angles α_0 et α_1 correspondant aux rayons réfléchis tangentiellement au cercle O'' , sont donnés par les formules

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_0 &= \frac{\sin \gamma_0/2}{l/r - \cos \gamma_0/2} \\ \operatorname{tg} \alpha_1 &= \frac{\sin \gamma_1/2}{l/r - \cos \gamma_1/2} \quad \Delta \alpha = \alpha_1 - \alpha_0. \end{aligned}$$

Cas général où l est différent de l' ou de l'' .

Quand les tangentes t_0 et t_1 sont trop différentes de l' , c'est-à-dire quand les cercles sont voisins, ou s'il s'agit de groupes de cercles qui interceptent), il y a lieu de partir des formules générales ci-dessous :

$$\frac{\sin \beta_0}{l/r - \cos \beta_0} = \pm \frac{\sin (2\beta_0 - \gamma_0)}{l(l'_0 - \cos (2\beta_0 - \gamma_0))} = \operatorname{tg} \alpha_0,$$

$$\frac{\sin \beta_1}{l/r - \cos \beta_1} = \pm \frac{\sin (2\beta_1 - \gamma_1)}{l(l'_1 - \cos (2\beta_1 - \gamma_1))} = \operatorname{tg} \alpha_1.$$

Le flux intercepté correspondra à $\Delta a = a_1 a_0$.

On les emploiera également pour les cercles éloignés dont un ensemble arrêtera le premier flux réfléchi. Evidemment on ne pourra, du moins en général, calculer β_0 à partir de γ_0 qu'en résolvant ces formules par approximation.

Quand les angles seront assez petits on pourra calculer l'angle $\Delta \alpha$ à partir de $\Delta \gamma$ qu'on mesurera sur le dessin, par la formule

$$\frac{\Delta \alpha}{\Delta \gamma} = \frac{1}{2 \frac{l}{r} - 1 - \frac{l}{l'}}$$

Si $\frac{\Delta \gamma}{\Delta \alpha}$ varie sensiblement dans l'intervalle $\Delta \alpha$ on calculera

$$\left[\frac{\Delta \alpha}{\Delta \gamma} \right]_0 = \frac{1}{2 \frac{l}{r} - 1 - \frac{l}{l'_0}} \quad \left[\frac{\Delta \alpha}{\Delta \gamma} \right]_1 = \frac{1}{2 \frac{l}{r} - 1 - \frac{l}{l'_1}}$$

et on prendra avec plus de précision, pour $\frac{\Delta \alpha}{\Delta \lambda}$, la moyenne arithmétique $\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\Delta \alpha}{\Delta \gamma} \right)_0 + \left(\frac{\Delta \alpha}{\Delta \gamma} \right)_1 \right]$. Ici aussi on corrigera s'il y a lieu Δa de

$$- \frac{d}{D + d} \Delta \sin.$$

Le rapport K global qui figurera dans l'expression du flux du fil boudiné que nous avons établie plus haut aura pour valeur

$$K = \frac{\Sigma \alpha_2 i - \frac{d}{D + d} \Sigma \Delta \sin}{\Sigma \alpha_1 i - \frac{d}{D + d} \Sigma \Delta \sin}.$$

Ce rapport K dépend uniquement des caractéristiques du boudinage. Il est facile de voir qu'il diminue quand le pas augmente et quand le diamètre du mandrin diminue car les flux trouvent relativement plus d'espace pour sortir après la première réflexion entre les spires.

D'ailleurs, pour les petits diamètres d'enroulement et les faibles pas tout au moins K n'est pas tout à fait le même après les diverses réflexions car l'image d'une spire ne se trouve pas au centre du cercle réflecteur, mais sensiblement à un demi-rayon du centre.

Aussi avons nous tiré les valeurs de K d'expériences que m'a sou-mises mon ami Trutat, ancien chef de travaux à l'Ecole Supérieure d'Electricité en me demandant de lui communiquer le résultat de mes réflexions à ce sujet.

Ces expériences ont été faites avec un soin remarquable pour qui connaît les difficultés des mesures photométriques précises.

D'ailleurs, il m'a ainsi incité à reprendre cette étude que j'avais entreprise puis abandonnée faute de temps et je dois l'avouer à cause des difficultés que j'y avais rencontrées. D'autre part, il m'a permis de vérifier l'exactitude suffisante de la théorie précédente que j'ai estimé pouvoir alors vous soumettre.

Les expériences ont eu pour but de comparer à température égale, un fil rectiligne de 190μ de diamètre et de 390 mm de longueur, et le même fil boudiné.

La puissance nécessaire pour amener le fil rectiligne à la température voulue est de 275 W ; la radiance globale étant de 118 W par centimètre carré, la température est d'après le tableau 1, de 2 825 K.

La brillance normale est de 708 bd/cm².

La brillance apparente est $708 \times 1,05 = 745$ bd/cm².

La radiance lumineuse est 2 220 lumen par cm².

Le flux lumineux théorique est 5.160 lumen.

Le flux trouvé expérimentalement est de 5 400 soit 4 pour 100 en plus.

Le pouvoir absorbant global est de 0,324.

Le pouvoir absorbant lumineux est de 0,442.

L'efficacité lumineuse trouvée est de 19,6 l/W.

Les chiffres du tableau III indiquent les rapports des puissances, des flux lumineux et des efficacités respectives des fils boudinés et des fils rectilignes. Nous avons calculé K à partir du rapport des puissances absorbées et des coefficients P calculés. Nous en avons déduit les valeurs des flux lumineux.

Etant donné les valeurs relatives des quantités en présence, K peut varier dans d'assez larges limites sans affecter sensiblement les valeurs de la puissance du flux lumineux.

Les résultats de M. Trutat sont en accord assez satisfaisant avec la théorie précédente.

Cependant une conclusion expérimentale importante qui semble en contradiction avec l'opinion de nombre de fabricants de lampes à in-

candescence, est que le boudin enroulé sur petite âme a le meilleur rendement à température égale. On dit en effet couramment que plus le filament est concentré, ce qui veut dire plus D est grand et p petit, meilleur est le rendement.

En réalité :

1° Le courant nécessaire pour amener le fil à une température déterminée est bien d'autant plus grand que le pas est grand et que le diamètre du mandrin est petit, ce qui semble naturel à priori.

2° Mais l'efficacité lumineuse varie peu avec le pas. Elle augmente au contraire quand le diamètre du mandrin diminue.

Il faut dire que notre théorie ne semble pas rendre compte, tout au moins dans la même proportion, de l'augmentation de l'efficacité quand le diamètre du mandrin diminue. Peut-être cela tient-il à l'approximation que nous avons faite que la température du filament est la même en tout point de la surface ? En effet, l'intérieur des spires des boudins à petite âme qui reçoit davantage de flux des spires placées en face est à une température plus élevée que l'intérieur des spires du boudin à grosse âme. Le flux lumineux qui sort entre les spires placées en face doit donc être augmenté d'autant.

Le calcul théorique facile du cas extrême où les spires sont très rapprochées l'une de l'autre tend à le prouver (v. tableaux II et III).

D'ailleurs, il ne semble pas que les *petits* filaments, boudinés sur petite âme, aient un meilleur rendement que lorsqu'ils sont boudinés sur grosse âme.

Quoi qu'il en soit la théorie rend compte d'une façon satisfaisante des flux et des puissances à prévoir.

Pour des températures différentes de la température d'expérience qui est une température de lampes à atmosphère gazeuse assez puissante, la valeur de K trouvée qui est invariable permet de calculer les puissances nécessaires et de prévoir les flux lumineux.

Nous avons eu la curiosité de calculer la puissance et les flux à une température normale de lampes à fil boudiné dans le vide : pour 2 450 K la puissance augmente de 2 pour 100, le flux reste sensiblement le même par rapport au fil rectiligne à 2 450 K, de sorte que l'efficacité d'une lampe boudinée dans le vide est d'environ 10 pour 100 inférieure à celle d'une lampe à fil rectiligne, ce qui est conforme à l'expérience.

TABLEAU III : T = 2825 K $\rho = 85 \mu$ W — cm

$\frac{p}{d}$	$\frac{D}{d}$	Chiffres expérimentaux			Valeur de K calculée d'après $\frac{W_b}{W_r}$	$\frac{\Phi_b}{\Phi_r}$ calculé	Rapport $\frac{\Phi_b}{\Phi_r} : \frac{W_b}{W_r}$ calculé	Valeurs expérimentales			
		$\frac{W_b}{W_r}$	$\frac{\Phi_b}{\Phi_r}$	$\frac{\Phi_b}{\Phi_r} : \frac{W_b}{W_r}$				T et d égaux		T et W égaux	
								$\frac{b_o}{b_r}$	$\frac{a_o}{a_r}$	$\frac{d_o}{d_r}$	$\frac{l_o}{l_r}$
1,46	1,58	0,753	0,722	0,96	0,56	0,7	0,93	1,15	1,33	1,10	1,21
»	2,11	0,715	0,666	0,93	0,67	0,67	0,94	1,18	1,40	1,12	1,25
»	2,63	0,684	0,63	0,925	0,74	0,63	0,92	1,21	1,47	1,14	1,29
»	3,16	0,656	0,592	0,905	0,78	0,61	0,93	1,23	1,52	1,15	1,32
»	4,2	0,638	0,565	0,885	0,79	0,59	0,92	1,25	1,57	1,16	1,35
»	5,27	0,623	0,55	0,883	0,81	0,57	0,91	1,26	1,60	1,17	1,37
1,25	3,16	0,608	0,537	0,885	0,82	0,56	0,92	1,28	1,64	1,18	1,39
1,46	»	0,656	0,592	0,905	0,78	0,61	0,93	1,23	1,53	1,15	1,32
1,64	»	0,695	0,611	0,88	0,74	0,65	0,93	1,20	1,44	1,13	1,28
1,95	»	0,757	0,68	0,90	0,68	0,71	0,93	1,15	1,32	1,10	1,21
Cas théorique extrême : K a été calculé directement : on en a déduit W_r , Φ_r , b, a, d et l											
1	1,5	0,50	0,46	0,93	0,90			1,41	2,00	1,26	1,59
1	∞	0,43	0,39	0,90	0,93			1,52	2,32	1,32	1,75

Le tableau III montre dans les dernières colonnes comment rattacher, à température égale, le calcul des fils boudinés à celui des fils rectilignes, c'est-à-dire les valeurs des coefficients a b c du premier chapitre par rapport aux mêmes coefficients correspondants des fils rectilignes.

3° LAMPES A FILAMENT RECTILIGNE DANS UNE ATMOSPHÈRE GAZEUSE

La présence d'une atmosphère gazeuse dans l'ampoule entraîne une déperdition de chaleur par conductibilité du gaz et par convection. On constate au toucher que la partie supérieure d'une lampe à atmosphère gazeuse allumée est à une température supérieure à celle des parties basses, ce qui indique que la chaleur transportée par convection n'est pas négligeable.

Cependant des essais effectués en ralentissant le mouvement ascensionnel du gaz au voisinage du filament par des micas placés au-dessus et au dessous du filament, ne semblent pas conduire à une augmentation pratiquement intéressante de la température de ce dernier.

Un fait d'expérience est que la déperdition de chaleur par conductibilité et convection n'est pas proportionnelle à la surface de refroidissement du filament. Autrement dit, la Loi de Newton n'est pas applicable ; la perte est bien proportionnelle à la longueur du filament mais croît moins vite que son diamètre : plus le filament est fin plus la perte est relativement importante.

Langmuir a expliqué le phénomène en disant que le fil est entouré d'une gaine de gaz qui ne participe pas au mouvement de convection ; le diamètre de cette gaine serait fort quand le filament est fin, il serait faible quand le fil est gros et bien des gens s'en vont depuis répétant cette explication.

Je veux bien admettre en ce qui concerne la perte par convection qu'un gros fil puisse gêner le mouvement ascensionnel du gaz davantage qu'un fil fin, comme un gros obstacle gêne le débit d'une rivière. Je veux bien admettre qu'il puisse exister autour du filament une gaine presque immobile de la même façon sans plus, que la vitesse d'écoulement d'une rivière près des rives est inférieure à celle au *thalweg*.

Mais en ce qui concerne la conductibilité, je préfère m'en référer aux lois connues de la propagation de la chaleur autour d'un cylindre.

Considérons le cas simple d'un fil indéfini tendu au milieu d'une ampoule cylindrique remplie d'un gaz ; les cylindres concentriques dont le rayon est intermédiaire entre le rayon R_0 du fil et le rayon R_a de l'ampoule sont par raison de symétrie des surfaces à température constante ; la quantité de chaleur W_c qui sort par unité de longueur par un cylindre de rayon r est la même que celle qui sort par le cylindre de rayon $r + dr$ d'où

$$-\frac{dt}{dr} = \frac{1}{2\pi r} \frac{W_c}{K}$$

K étant le coefficient de conductibilité thermique du gaz. On en déduit

$$W_c = \frac{(T_0 - T_a) 2\pi K}{\text{Log} \frac{R_a}{R_0}}$$

R_a et T_a étant le rayon et la température de l'ampoule.

Envisageons un fil dont le diamètre est le millième de celui de l'ampoule ; un fil 10 fois plus gros subira une perte de conductibilité qui sera d'après cette formule seulement une fois 1/2 plus forte.

Je m'empresse d'ajouter que je n'ai proposé cette formule que pour expliquer qualitativement le phénomène car elle suppose constante la conductibilité thermique ; or, il est clair que pour l'étendue des températures auxquelles est soumis le gaz, il y a lieu de tenir compte des variations de la conductibilité en fonction de la température.

Une étude quantitative nécessite le recours à l'expérience pour la détermination de la perte par conductibilité ainsi que de la perte par convection.

Une formule approximative qu'on semble pouvoir adopter pour la déperdition globale est la suivante :

$$Wp = Kld^n T^{1.9},$$

$$n \neq 0,24,$$

K dépend de la nature du gaz, de sa pression et du diamètre de l'ampoule.

4° LAMPES A FIL BOUDINÉ DANS UNE ATMOSPHÈRE GAZEUSE

Dans ce cas le problème est encore plus complexe et le calcul rigoureux est complètement impossible.

La puissance introduite par effet Joule dans la lampe se retrouve en effet sous quatre formes :

1° Puissance émise par le rayonnement : W_e ;

2° Puissance rayonnante absorbée par les spires voisines : W_a (comme dans la lampe à fil boudiné dans le vide) ;

3° Puissance reçue des spires voisines par chaque spire grâce à la conductibilité du gaz : w_c ;

4° Puissance évacuée à l'extérieur par conductibilité et convection : W_p .

$$\begin{aligned} W'_J &= W_e - W_a - W_c + W_p \\ &= W_J - W_a - W_c + W_p \end{aligned}$$

W_p/W_J augmentant quand d diminue, l'application d'une formule analogue à celle des fils rectilignes $d = KI^{\frac{2}{3}}$ dans le vide conduit, au lieu d'une température constante, à une température plus forte pour les grosses lampes : à température égale l'exposant de I est supérieur à $2/3$; mais à durée égale un gros filament supporte une température plus élevée ; l'expérience montre que l'application de $d = KI^{\frac{2}{3}}$ sont trop poussées. Il faut donc prendre pratiquement l'exposant inférieur à $2/3$.

Par une étude plus approfondie, on constate que la déperdition de $\frac{2}{3}$ conduit à une gamme de températures telle que les petites lampes chaleur dépend d'un grand nombre de variables indépendantes : température du filament, forme et diamètre de celui-ci, nature du gaz (azote ou argon), pression, dimensions de l'ampoule.

Ces facteurs dans les limites de variations pratiques n'ont pas tous la même importance. De plus la chaleur relative perdue qui est assez faible, sauf dans les petites lampes, tend à le devenir de moins en moins au fur et à mesure que les progrès de la technique permettent de porter les filaments à des températures de plus en plus élevées.

On pourra donc se contenter de chercher expérimentalement la majoration de puissance nécessaire pour amener un fil boudiné déterminé dans un gaz à la même température que dans le vide. L'ordre de grandeur de cette majoration est environ :

75	pour	100	dans une lampe de	25 W
25	—	—	—	100 »
15	—	—	—	300 »
11	—	—	—	500 »
8	—	—	—	1 500 »

Comme nous l'avons dit, ces chiffres sont susceptibles de variations assez importantes ; par exemple en ce qui concerne la nature du gaz, à cause de la différence de conductibilité de l'azote et de l'argon ($5,2 \times 10^{-5}$ contre $3,9 \times 10^{-5}$) un filament de lampe Stella de 25 W de fabrication ancienne à l'azote pouvait être à environ 2 650 K. Le même filament dans l'argon à 10 0/0 d'azote atteignait 2 857. Pour ramener la température à une valeur convenable, les caractéristiques ont dû être modifiées, on trouva 2 703 K. A titre d'indication, une Philips de 25 W était à 2 740 K.

Mais l'argon étant aujourd'hui utilisé universellement, la question ne se pose plus. Les seules variables à étudier se ramènent aux suivantes : diamètre et température du filament, caractéristiques du boudinage.

Les considérations précédentes montrent qu'il reste avant d'épuiser la question, des études expérimentales utiles et intéressantes à faire dans ce domaine où la contribution française est si mal représentée.

En résumé, si l'on peut considérer la théorie des lampes à fil rectiligne et à fil boudiné comme parfaitement au point, l'étude des lampes à atmosphère gazeuse est loin d'être aussi poussée, malgré des travaux fort intéressants, que celle de bien des récepteurs électriques d'aspect beaucoup moins simple.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS ⁽¹⁾

PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ

Exécution des enroulements des machines triphasées, par Maurice LE CADRE.

Dans cet ouvrage essentiellement descriptif et spécialement écrit pour les jeunes ingénieurs, les contremaîtres et les ouvriers électriciens, l'auteur s'affranchit de toute considération théorique préliminaire sur le fonctionnement des machines triphasées ainsi que sur la théorie des enroulements et expose exclusivement du point de vue pratique la description des bobinages et les procédés employés pour leur réalisation.

L'ouvrage comprend deux parties :

Dans la première, illustrée de nombreuses photographies judicieusement choisies et de quelques figures d'une parfaite clarté, l'auteur expose en détails, quoique sous une forme élémentaire, la diversité des bobinages utilisés, la pratique de leur construction et de leur mise en place, ainsi que les soins particuliers qu'exige ce travail.

La deuxième partie constitue un recueil de schémas d'enroulement permettant au lecteur de suivre en détail les bobinages les plus usuels.

APPAREILLAGE

Protection of electrical Circuits and equipment against lightning. — Brochure de 107 pages, éditée par l'« U. S. Department of Commerce, Bureau of standards ». — En vente chez le « Superintendent of Documents », à Washington. — Prix : 25 cents.

Cette brochure qui porte le n° 95 de la série des publications éditées par le Bureau of Standards, contient le rapport préliminaire du Comité chargé de l'examen des mesures de protection contre la foudre dans les installations de transport et de distribution, de traction et de télécommunication. Après quelques considérations générales sur l'amplitude et la nature des surtensions induites dans les lignes aériennes, les parafoudres, leur jonction et leur désignation, et examine la protection des installations de traction (usines, lignes, locomotives) celle des réseaux de transport et de distribution puis celle des circuits de signaux et de télécommunication. Des indications numériques sont données sur la réduction des surtensions susceptibles d'être obtenues par l'emploi de câbles de terre. D'autre part, l'installation des prises de terre, la vérification des terres fait l'objet de plusieurs pages suivies d'un résumé et d'une comparaison des différentes méthodes proposées. En annexe, le lecteur trouvera des renseignements très intéressants sur la foudre, son origine, ses manifestations, ses effets, ainsi qu'une bibliographie très complète des études et articles parus en Amérique sur la question.

RECHERCHES PHYSIQUES. MESURES.

Principes scientifiques de l'Electrotechnique, par BENISCHKE. — Albin Michel, éditeur, 22, rue Huyghens, Paris. — Traduction par A. Charlot, d'après la 6^e édition allemande. — Un vol. 24 × 16 de 702 pages.

Comme son titre l'indique, cet ouvrage expose d'abord les lois fondamentales du magnétisme et de l'électricité indispensables aux futurs ingénieurs pour aborder à fond l'étude de l'Electrotechnique et comprendre réellement les applications

(1) Ces ouvrages peuvent être consultés à la Bibliothèque de la Société Française des Electriciens 14, avenue Pierre-Larousse, à Malakoff, de 14 à 18 h., tous les jours sauf le dimanche.

de la science électrique à l'industrie. Puis, l'auteur étudie tout particulièrement dans des chapitres très substantiels et d'une haute tenue scientifique l'induction mutuelle, les phénomènes de capacité, les courants non stationnaires, les ondes composées, le passage de l'électricité à travers les non-conducteurs, etc.

Gravitation, Lumière et Electromagnétisme. par Emile LEVIN, Ingénieur en Chef à la Compagnie des Chemins de fer Paris-Orléans. Un vol. in-8 de 25,5 × 16,5 de 60 pages. Librairie scientifique Albert Blanchard, 3, place de la Sorbonne, Paris. Prix : 18 francs.

M. Levin expose dans cet ouvrage une nouvelle hypothèse sur la constitution de la matière, qui a pour principal avantage d'expliquer en une seule théorie les phénomènes de la mécanique, de l'optique et de l'électricité, trois domaines qui jusqu'ici étaient envisagés de façon distincte. L'auteur a été conduit à cette hypothèse en observant que, si l'on approfondit l'étude de tous les phénomènes de la nature, on s'aperçoit qu'ils ont nécessairement une cause unique. La théorie de M. Levin a le mérite de permettre d'expliquer très simplement les contradictions rencontrées jusqu'ici dans les théories de Newton, Huygens, Michelson et Einstein. Ces théories exigent le recours à la notion de quatrième dimension. Pour permettre à des esprits peu familiarisés avec cette notion, de saisir les développements de son ouvrage, M. Levin utilise une simplification des plus heureuses qui permet de ramener cette étude à celles des phénomènes de l'espace à trois dimensions.

Le système métrique des poids et mesures, par G. RIGOURDAN, Astronome titulaire à l'Observatoire de Paris. — Un volume in-18 de 21,5 × 15 cm. de 420 pages. Gauthier-Villars, 55, quai des Grands-Augustins.

Cet ouvrage contient l'historique complet du système métrique depuis les premières suggestions faites au moyen âge et dans divers pays en vue d'uniformiser les unités de mesure, jusqu'à l'exposé de la situation actuelle de l'extension de ce système. On y trouve l'exposé des circonstances, d'ordre moral en particulier, qui favorisèrent la réalisation de cette réforme (desir de tous d'utiliser des mesures rompant avec les habitudes de l'ancien régime), le récit des discussions auxquelles donna lieu l'annonce du projet à la Constituante, les tribulations de toute sorte de la mission chargée des mesures sur le terrain, mesures qui effectuées en période troublée, rendaient suspects les ingénieurs de la mission. L'auteur signale les difficultés de toute nature qu'il fallut surmonter pour obtenir la précision souhaitée et l'enthousiasme qui salua, à la Constituante, l'annonce du succès de ces études.

Une partie de l'ouvrage contient les lois et décrets mettant le nouveau système en vigueur et le compte rendu in extenso des discussions qui s'élevèrent à la Chambre à ce sujet. On y trouve enfin des chapitres sur la diffusion du système métrique à l'étranger, l'installation du bureau international des poids et mesures et sur les travaux de la commission française de 1872 à 1900.

MÉCANIQUE APPLIQUÉE

Essais, réglage et mise au point des moteurs d'automobiles et d'aviation, par René BARDIN, Ingénieur Esa-Esme. — Un vol. broché 16 × 24 de 90 pages. — Librairie Centrale des Sciences, 29, quai des Grands-Augustins, Paris.

Cet ouvrage de caractère essentiellement pratique contient la description des divers appareils utilisés dans les essais des moteurs à explosions : frein de Prony, frein Fronde, dynamo-frein, moulinet Renard, enregistreur Richard. Il donne des indications sur la manière d'interpréter les diagrammes fournis par ce dernier.

Un chapitre spécial est consacré aux moteurs d'aviation dont les essais demandent à être conduits d'une manière particulière, en égard aux conditions dans lesquelles ils sont appelés à fonctionner.

Dans la dernière partie de l'ouvrage, l'auteur indique la manière pratique de mettre un moteur au point, en utilisant les renseignements donnés par les divers appareils utilisés au cours des essais.

ENSEIGNEMENT

Physique Moderne, par Gaetano CASTELFRANCHI de l'Ecole Supérieure des Ingénieurs de Milan. Traduction française de M. A. Quemper de Lanascot. Un vol. in-8° de 24 × 16 cm. de 650 pages. Librairie scientifique Albert Blanchard, 3, place de la Sorbonne, Paris. Prix : 10 francs.

Cet ouvrage constitue un exposé synthétique et méthodique de la physique d'aujourd'hui et des travaux théoriques et expérimentaux des plus grands physiciens contemporains. L'auteur montre que dans les trente dernières années la physique a surtout progressé sur le terrain de l'atomisme, dans le monde des infiniment petits. Il souligne que l'intérêt de ces études ne réside pas seulement dans la satisfaction du besoin profond que nous avons d'essayer de dévoiler l'essence, le substratum de la nature, mais aussi dans les applications pratiques des résultats de ces recherches. Citons parmi les principaux chapitres : le mouvement brownien — la relativité et la masse — les rayons X et le numéro atomique — l'atome nucléaire — l'atome de Bohr — l'effet Compton — les quanta de lumière.

LÉGISLATION

Des atteintes à la Propriété à raison des Travaux publics, par Ch. BLAEVOET, Docteur en droit, Lauréat de la Faculté de Droit de Paris. — Un vol. 22,5 × 14,5 de 255 pages. — Edité par la Librairie Marcel Giard, 16, rue Soufflot et 12, rue Toulhier, à Paris. — Prix, broché : 40 f.

Ce livre qui présente le plus grand intérêt pour les Producteurs et les Distributeurs d'énergie est consacré à l'étude des atteintes à la propriété privée à raison de l'exécution de Travaux Publics et en particulier à l'étude des atteintes spéciales résultant des aménagements de chutes et des installations de distribution.

Après avoir rappelé ce qu'il faut entendre par le droit de propriété, l'auteur examine, du point de vue général la nature et la gravité des atteintes à ce droit, la réparation des préjudices, et l'imputation des responsabilités, puis il traite dans une seconde partie des atteintes imposées comme conditions juridiques d'exécution des Travaux Publics, qu'il s'agisse d'occupation temporaire ou d'expropriation.

La troisième partie du livre est consacrée aux atteintes résultant de la loi du 16 octobre 1919 et des concessions de production d'énergie, ainsi qu'au sort des accords antérieurs à la loi du 16 octobre 1919. La quatrième partie traite des atteintes imposées en vue de la distribution de l'énergie (servitudes légales ou expropriations et à cette occasion l'auteur examine les propositions de lois faites par MM. les Députés Bories, Carron et Falcoz d'une part, et MM. les sénateurs Mollard, Milan et Machet d'autre part, en vue de simplifier et d'adapter aux circonstances actuelles les procédures prévues par la loi du 15 juin 1906.

La dernière partie de ce livre est consacrée aux moyens d'opposition des propriétaires et à l'examen des mesures à prendre en cas d'oppositions.

Deux annexes enfin, concernent les conventions entre distributeurs et propriétaires et les atteintes résultant de l'électrification des chemins de fer.

Cet ouvrage très documenté qui constitue l'exposé et le guide le plus sûr et le plus complet sur les questions traitées et qui se termine par une liste des décisions judiciaires rendues en la matière, est appelé à rendre les plus grands services.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS

SOMMAIRE

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

Tendances actuelles dans la construction et l'utilisation des interrupteurs à haute tension, (M. A. ROTH), p. 1030. — Le réglage des fours électriques par variation de tension, (M. P. BERGEON), p. 1057. — La protection des installations à basse tension contre la foudre, (M. Ch. LEDOUX), p. 1061. — Les électrolytes forts, (M. R. DUFOUR), p. 1080. — Autoéquiréactance, (M. BENOIT), p. 1096. — Vue d'ensemble sur l'emploi du matériel automatique dans les réseaux téléphoniques ruraux, (M. DI PACE), p. 1105. — Documentation sur le chromage, (M. ALTMAYER), p. 1117.

TRAVAUX DES SECTIONS :

Courts circuits dans les réseaux et problèmes connexes, (M. LANGLOIS-BERTHELOT), p. 1131.

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ, p. 1147.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 1148.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

La reproduction des mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des Auteurs.

Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant le manuscrit.

4^e série, tome X, n° 110.

TENDANCES ACTUELLES DANS LA CONSTRUCTION ET L'UTILISATION DES INTERRUPTEURS A HAUTE TENSION ⁽¹⁾

par M. Arnold ROTH

Directeur des Ateliers de Constructions Electriques de Delle, Villeurbanne.

Exposé

L'auteur montre l'influence heureuse des recherches faites dans les laboratoires des différentes maisons, en France et à l'étranger, sur la construction des interrupteurs à haute tension. Ces recherches ont conduit à une augmentation considérable de la sécurité et du pouvoir de rupture des interrupteurs. Ces recherches ont également conduit à l'établissement d'interrupteurs à haute tension et grande puissance ne comportant pas d'huile, interrupteurs qui sont actuellement encore en cours d'essai.

D'autre part, l'établissement de réglementations précises dans les différents pays permet de définir le pouvoir de rupture des appareils et de choisir, par conséquent, les appareils adaptés aux besoins de l'exploitation.

Les procédés de fabrication des interrupteurs ont été modifiés profondément, depuis quelques années, l'acier embouti et la soudure étant largement employés dans ce genre de construction.

Nous assistons depuis quelques années dans le domaine des interrupteurs à haute tension à un développement intense caractérisé par l'accroissement du nombre de problèmes posés par les nécessités de l'exploitation, d'une part, par le remplacement des tâtonnements dans la conception des appareils par des procédés de recherches scientifiques, d'autre part

Tous les jours, nous voyons se produire dans ce domaine de petites et même de grandes révolutions. Il n'est pas rare qu'on voit doubler ou tripler le pouvoir de rupture d'un type d'interrupteur, sans que ni ses dimensions, ni son prix de revient ne soient augmentés. Les risques d'accidents, par contre, sont diminués. Il est, du reste, merveilleux de constater que grâce à la nature de l'arc électrique, qui ne possède ni inertie ni cohésion, les modifications nécessaires pour arriver à ce résultat sont souvent insignifiantes.

I. — POUVOIR DE RUPTURE

Avant de parler des interrupteurs, il est nécessaire de s'entendre sur la définition du pouvoir de rupture des appareils. Beaucoup de malentendus proviennent du manque de définitions à ce sujet ou même

(1) Ce rapport sera présenté et discuté au cours de la Semaine de discussions de novembre, le jeudi 27 novembre.

de définitions n'ayant aucun sens, telles qu'il s'en trouve dans certains règlements.

Aujourd'hui, nous constatons qu'au moins les règlements européens, qui traitent la question de la rupture, sont presque identiques, c'est-à-dire le règlement français (en examen), le règlement allemand et le règlement suisse.

Les figures 1 et 2 représentent l'allure du courant de court-circuit et de la force électromotrice pour les deux cas du court-circuit au

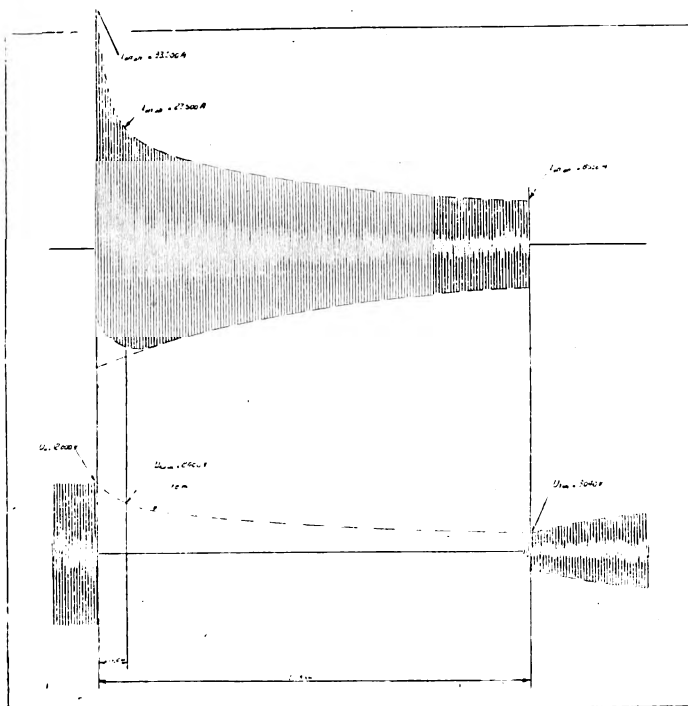


Figure 1.

voisinage de l'alternateur et du court-circuit séparé de l'alternateur par des réactances, telles que transformateurs, lignes et bobines de réactances. Nous appelons ce dernier : « court-circuit dans le réseau », bien que cette désignation ne corresponde pas sans exception.

La fig. 1 montre l'intensité qui comporte une asymétrie prononcée, asymétrie qui s'amortit très vite. La composante alternative de l'intensité s'amortit également, mais en un temps beaucoup plus long. Elle atteint une valeur constante qu'on appelle courant de court circuit permanent. La diminution de la composante alternative est due

à l'affaiblissement du champ principal de l'alternateur qui, lui, est producteur de la f.é.m. induite dans le circuit.

La tension aux bornes de l'interrupteur avant le court-circuit correspond à la f.é.m. diminuée par les chutes de tension dans le circuit. Cette tension tombe à zéro, lors de l'établissement du court-circuit. Elle réapparaît lors de la rupture du courant ; mais sa valeur est diminuée parce que la f.é.m. est diminuée.

Ce dernier fait est très important, parce que nous trouvons là la source de tous les malentendus. Il est évident que c'est seulement

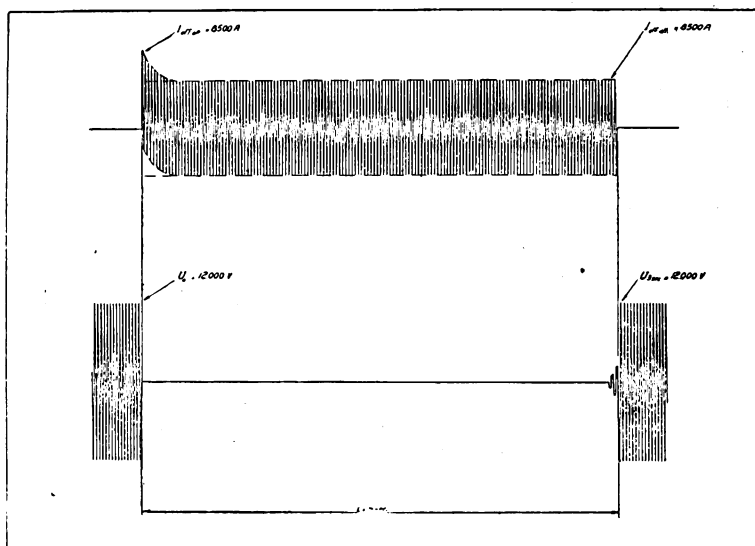


Figure 2.

la tension existant au moment où se produit l'arc de l'interrupteur qui détermine les phénomènes, lors de la rupture du courant. Le fait que cette tension et la f.é.m. qui la produit peuvent être plus grandes au commencement du court-circuit ne peut pas influencer ces phénomènes de rupture.

Or, comme le montre la fig. 1, la tension de rupture peut être très inférieure à la tension normale du réseau, dans le cas d'un court-circuit près d'une centrale.

Ainsi que le montre la fig. 2, les phénomènes se passent différemment en cas de court-circuit dans le réseau. On voit qu'ici la diminution du courant et de la tension peut être insignifiante. Nous sommes donc ici en présence d'un phénomène ne variant pas avec la

tension, si nous faisons exception de l'asymétrie du courant pendant les premières demi-périodes. Un exemple avec chiffres mettra la différence encore mieux en évidence. Supposons qu'il s'agisse d'une centrale de 100 000 kVA et 12 000 V, c'est-à-dire d'une intensité normale de 4 800 A et que la valeur efficace de la composante alternative instantanée du court-circuit atteigne 7 fois la valeur de l'intensité normales, c'est-à-dire 33 500 A. Elle tombe à 23 500 A après 0,2 s et à sa valeur permanente de 8 500 A après environ 2 à 3 s.

Ces valeurs sont assez normales pour des turbo-alternateurs. Il est évident que la f.é.m. productrice d'intensité, et par conséquent la tension lors de rupture du court-circuit, baissent proportionnellement aux intensités, c'est-à-dire de 12 000 V à 8 400 V après 0,2 s et à 3 040 V en régime permanent.

Nous attirons spécialement l'attention sur cette dernière valeur. Dans ce but, nous admettons deux cas :

1° l'interrupteur coupe après 0,2 s. Il doit donc couper 23 500 A sous 8 400 V ou 335 000 kVA ;

2° le réglage des relais est tel que l'interrupteur coupe après 3 s. Il doit donc couper 8 500 A sous 3 040 V ou 44 600 kVA. Cette dernière puissance est inférieure à 1/7 de la puissance à couper, dans le cas où le délai est de 0,2 s, et n'atteint même pas la moitié de la puissance normale de la centrale. C'est pour cette raison que beaucoup d'interrupteurs ne subissent jamais d'accidents, bien que leur pouvoir de rupture soit très en dessous la puissance calculée ou estimée de la centrale.

Ces calculs mettent en relief l'influence du réglage des relais à temps différé sur la tenue de l'interrupteur.

Beaucoup de personnes procèdent d'une façon différente pour le calcul du pouvoir de rupture. Elle ne tiennent pas compte des deux diminutions, mais seulement de celle de l'intensité. Elles croient donc avoir coupé dans notre second cas les 8 500 A, non pas sous 3 040 V, mais sous 12 000 V. Ajoutons que cette façon de calculer est autorisée par certains règlements ; mais il est inutile de dire qu'elle ne peut pas se justifier, la tension de service n'ayant rien à voir avec le phénomène de rupture.

Les choses se passent différemment lors de court-circuit « dans le réseau ». Admettons que les données du réseau soient telles que nous ayons 8 500 A sous 12 000 V, au début. Ici, ni la tension, ni l'intensité ne baissent considérablement. Ces valeurs initiales sont donc à

peu près maintenues, quel que soit le réglage du temps de déclenchement des relais. Ce réglage est donc sans grande importance sur la contrainte des interrupteurs.

Admettons maintenant qu'un interrupteur installé dans la centrale ci-dessus ait toujours bien coupé ses 8 500 A d'intensité de court-circuit avec un réglage de 3 s, c'est-à-dire sous une tension de 3 040 V. D'après la méthode de calcul erronée mentionnée plus haut, l'exploitant ainsi que le constructeur de l'appareil peuvent croire cet appareil capable de couper 8 500 A dans un réseau de 12 000 V.

Admettons maintenant que cet interrupteur ait fonctionné assez près de sa limite du pouvoir de rupture, et installons-le dans un réseau où il devra couper les 8 500 A sous 12 000 V, et non plus sous la tension réduite de 3 040 V comme ci-dessus ; il fera infailliblement explosion. Le seul remède contre de telles erreurs, graves de conséquences, est de fonder la détermination du pouvoir de rupture d'un appareil sur la tension de rupture et sur l'intensité au moment de la rupture.

Ajoutons qu'il devrait être également interdit de comprendre la composante courant continu dans le calcul du pouvoir de rupture d'un interrupteur. Souvent cette composante, loin d'aggraver la rupture, la facilite.

II. — FONCTIONNEMENT DES INTERRUPTEURS DANS L'HUILE

On connaît aujourd'hui les caractéristiques des interrupteurs à un degré qui permet une analyse presque complète de leur fonctionnement lors des essais. Ces caractéristiques sont : les intensités dans 2 phases, les tensions dans 2 phases, la pression dans l'huile, la pression dans l'air et le diagramme de vitesse. Ces caractéristiques renferment toutes les données nécessaires pour juger le fonctionnement et le degré de sécurité d'un appareil.

Les phénomènes qui se produisent dans un interrupteur au moment de la rupture sont connus : mise en marche du mécanisme, formation d'arcs, développement de gaz, produisant à son tour des ondes de pression dans l'huile et faisant monter l'huile sous la forme approximative d'un piston.

En présence de phénomènes aussi complexes, une question se pose, à savoir s'ils comportent une continuité suffisante pour pouvoir donner une base solide pour le dimensionnement des appareils. Certains

auteurs prétendent, en effet, trouver une dispersion presque illimitée des résultats d'essais qu'on trouve lors de la rupture, bien que les conditions restent les mêmes. Nous leur opposons les résultats d'une expérience basée sur plusieurs milliers d'essais entre 3 000 et 110 000 V et 1 000 et 340 000 kVA. Cette expérience a démontré que, pour des appareils bien étudiés, les résultats des essais exécutés dans les mêmes conditions sont pratiquement constants. Les variations dans la

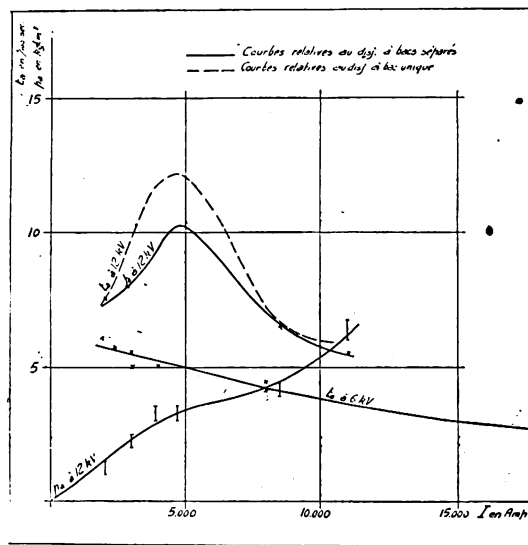


Figure 3.

pression ne dépassent ± 20 pour 100, celles du temps de rupture, c'est-à-dire de la longueur de l'arc, ± 15 pour 100 sous condition bien entendu que l'intensité, la tension de rupture et la fréquence propre d'oscillation du circuit coupé restent constantes (fig. 3 et 4).

III. — DE QUELQUES DIFFICULTÉS RENCONTRÉES DANS LA CONSTRUCTION DES INTERRUPTEURS DANS L'HUILE

Ces difficultés sont surtout dues au *développement de gaz important*, aux efforts dynamiques lors de réenclenchement sous de fortes intensités, à l'influence néfaste de certains isolants sur l'arc, lorsqu'ils sont touchés par cet arc.

Les fig. 5 et 6 montrent la rupture de 15 500 A sous 12 000 V, c'est-à-dire de 320 000 kVA, avec un temps de rupture de 0,3 s. Il

est produit, lors de cette rupture, 262 litres de gaz, chiffre assez normal.

Les fig. 7 et 8 montrent un autre exemple, il s'agit de la coupure

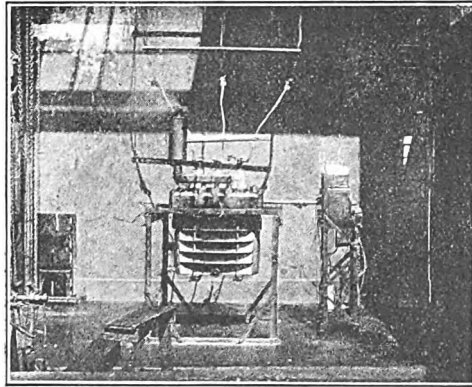


Figure 6.

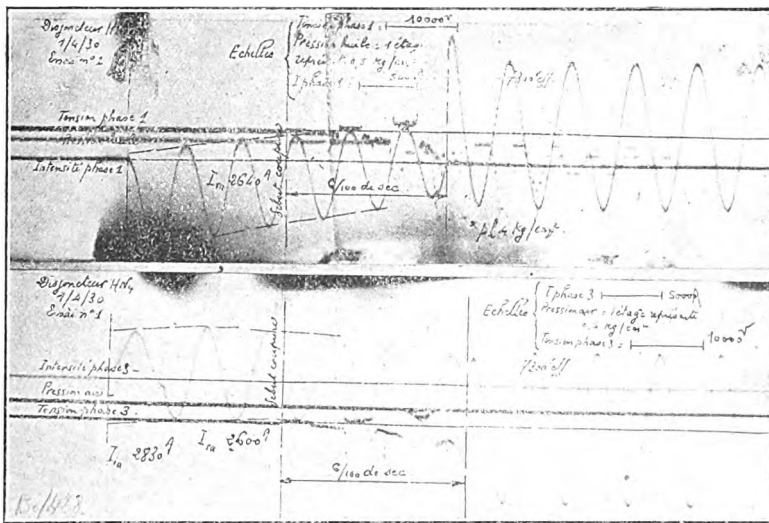


Figure 7.

de 2 600 A sous 12 000 V, par un petit disjoncteur. Il est produit 40 litres de gaz.

On comprend facilement que cette production de gaz très intense en un temps très court donne naissance à des phénomènes variés et surtout à une certaine pression dont la construction doit tenir compte.

Nous calculons dans le premier cas une surpression de 2,5 atmosphère, dans le deuxième, une surpression de 0,75 atmosphère.

En outre, le développement de gaz étant localisé et se produisant en un temps extrêmement court, il en résulte des pressions locali-

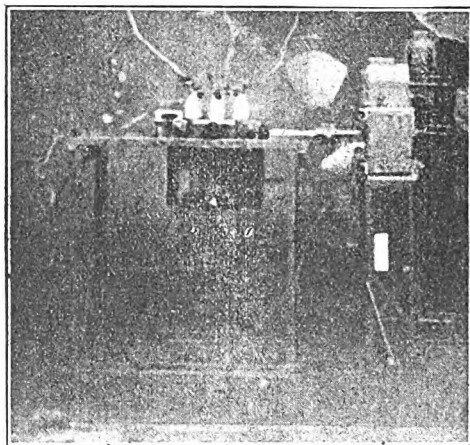


Figure 8.

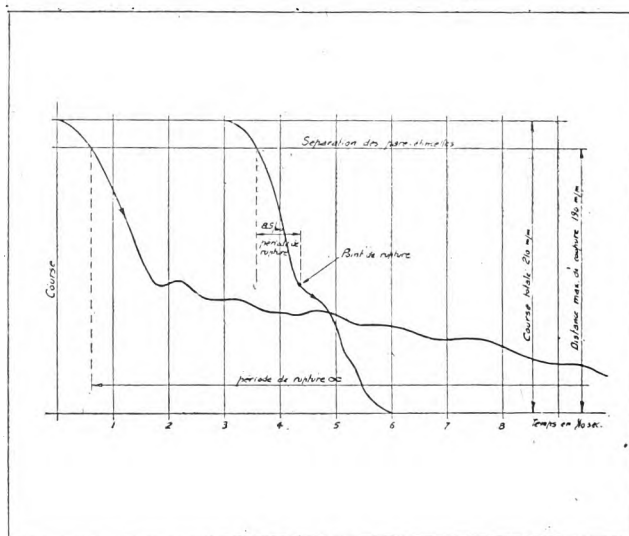


Figure 9.

sées beaucoup plus élevées. Il en résulte des différences de pressions à l'intérieur de la cuve, qui peuvent rendre impossible le fonctionnement mécanique des appareils, si l'on n'a pas pris des mesures spéciales pour y parer.

La fig. 7 montre une pression de 4 atmosphères dans la cuve, de moins de 0,5 atmosphère dans l'air.

La fig. 9 montre un cas où cette différence de pression a produit l'arrêt presque complet de la traverse de l'interrupteur. Par conséquent, l'arc ne s'allonge plus, ne s'éteint pas et la production de gaz illimitée fait sauter l'appareil sous 80 000 kVA.

La fig. 10 montre la suite de cet accident qui a provoqué un incendie, tandis que la fig. 11 le montre après correction complète et en coupant 300 000 kVA.

Les chocs de pression eux-mêmes peuvent donner lieu à des con-

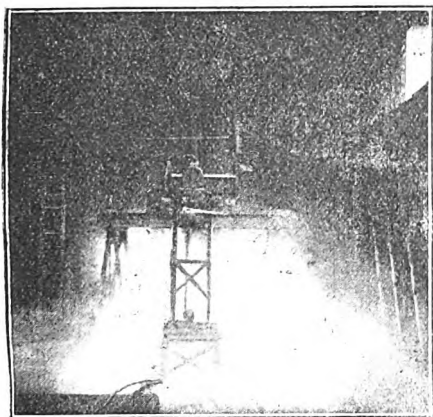


Figure 10.

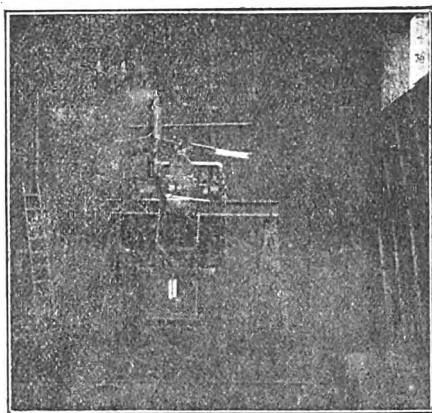


Figure 11.

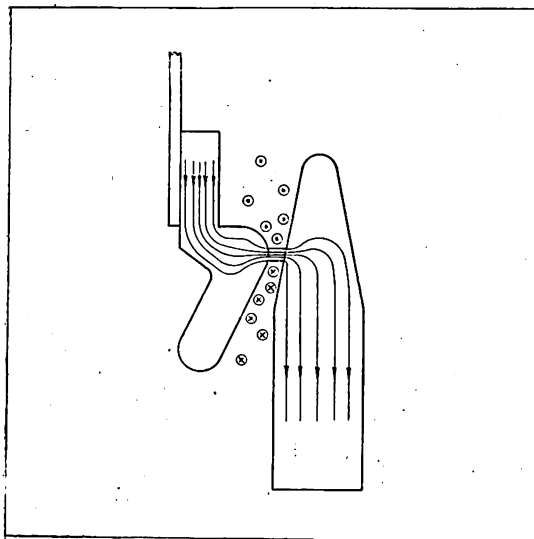
traîntes sur la cuve dépassant sa rigidité, surtout pour des interrupteurs construits pour de faibles pouvoirs de rupture.

Les efforts dynamiques commencent à se faire sentir à partir de 10 à 20 000 A. Ils sont surtout dangereux lors de réencenchements sur court-circuit. Ce sont les pare-étincelles qui présentent le point le plus susceptible.

La fig. 12 montre le champ magnétique à l'endroit du contact des doigts. Pour un déplacement virtuel du doigt dans le sens de l'ouverture, le champ augmente. D'après la loi des travaux virtuels, il se produit donc un effort sur ce doigt dans le sens de l'ouverture.

Si cet effort atteint 8 à 12 kg, ce qui est le cas pour une intensité de 20 000 A, valeur pointe de l'intensité, il en résultera un arc et de là fatalement une soudure comportant l'arrêt de la traverse. Il est donc nécessaire de prendre des mesures spéciales pour empêcher la

répulsion des contacts. Ajoutons que les soudures mentionnées peuvent être très solides. Souvent il est nécessaire de les séparer au burin.



• Figure 12.

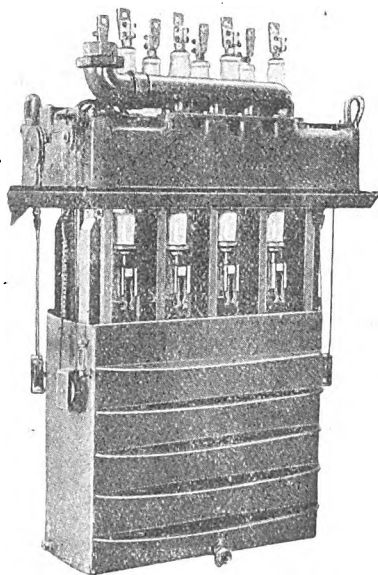


Figure 13.

La fig. 13 montre une solution du problème. Les paillettes en cuivre des doigts à gauche et à droite du contact mobile s'attirent. Leur

longueur est telle qu'elles compensent assez exactement l'effort de répulsion exercé sur les doigts.

Pour des intensités dépassant 100 000 A, les efforts sur la traverse commencent également à être dangereux ; leur ordre de grandeur est de 600 kg par pôle, c'est-à-dire presque de 2 tonnes pour les 3 pôles.

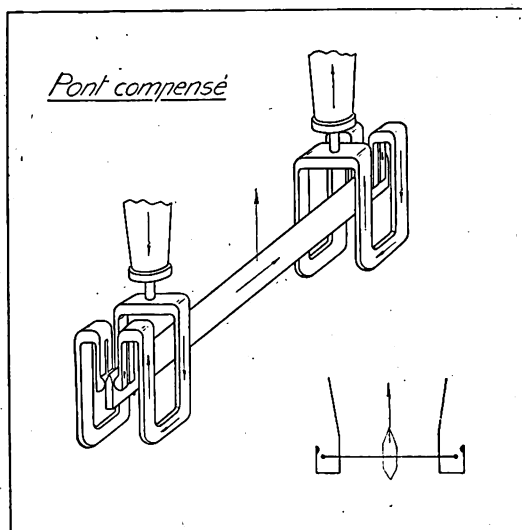


Figure 14.

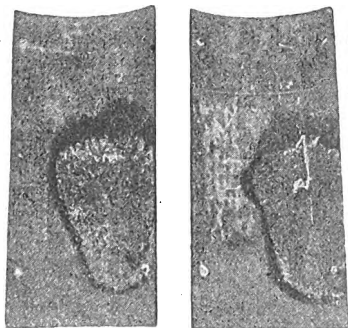


Figure 15.

La fig. 14 montre une solution de ce problème. Ainsi les efforts sur la traverse sont compensés par des efforts sur les petites pièces parallèles, de façon que l'on arrive à une annulation presque complète des efforts.

L'influence de la qualité des matières isolantes sur l'arc peut être néfaste, si ces matières sont touchées par l'arc. La fig. 15 montre un

exemple d'une paroi brûlée qui avait entraîné la destruction de l'appareil, l'arc ayant été maintenu. Cela nous conduirait trop loin d'entrer ainsi dans les détails. Mentionnons seulement que la bakélite s'est révélée très mauvaise à ce point de vue, le bois imprégné, par contre, très bon.

IV. — TENDANCES DANS LA CONSTRUCTION DES INTERRUPTEURS DANS L'HUILE

On peut constater que l'industrie parvient de plus en plus à créer des disjoncteurs coupant réellement la puissance garantie. De nombreux constructeurs s'étaient proposé depuis longtemps d'atteindre

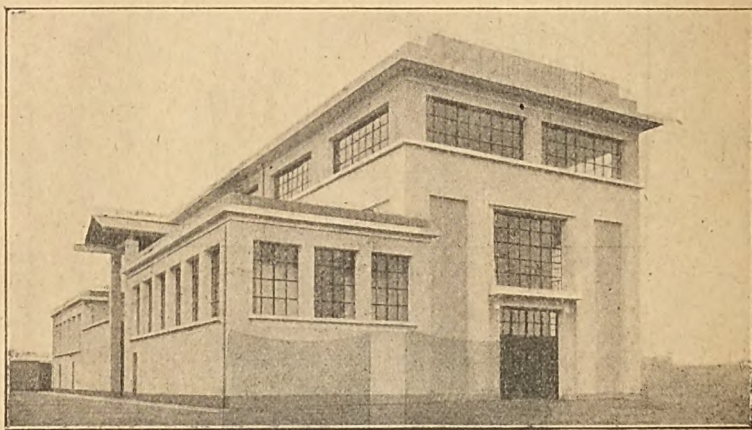


Figure 16.

ce but ; mais c'est aujourd'hui seulement que l'on dispose des moyens de le réaliser, c'est-à-dire des stations d'essais munies de machines suffisamment puissantes pour pouvoir réellement essayer des disjoncteurs. Les figures 16 et 17 montrent un exemple d'une telle station.

Nous voudrions aller un peu plus loin. Sera-t-il nécessaire d'établir un *facteur de sécurité* dans la construction d'un interrupteur à huile, comme on le fait pour un problème technique quelconque, tel que la construction d'un pont, d'une chaudière, d'une ligne à haute tension ? On peut procéder de 2 manières : ou bien on peut dimensionner un interrupteur de telle façon qu'il tienne juste sa puissance limite et qu'il fasse explosion si on la dépasse, ou alors, on peut introduire dans les contraintes subies par l'interrupteur travaillant à sa

puissance limite une sécurité, en ce qui concerne les distances, surtout la résistance à la pression et les contraintes mécaniques sous les efforts électrodynamiques.

Prenons comme exemple de cette dernière façon de procéder un interrupteur garanti pour 300 000 kVA sous 12 000 V travaillant avec une contrainte maximum de 5 atmosphères ; nous essayerons donc chaque appareil avec une pression de 10 atmosphères.

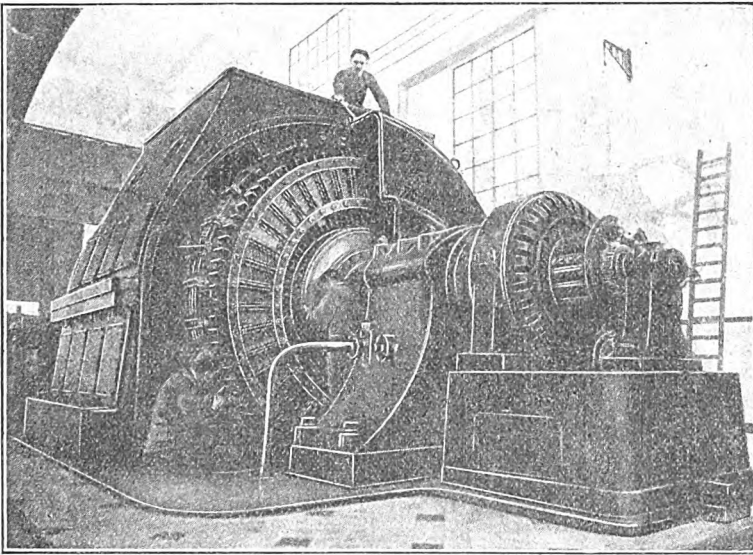


Figure 17.

Pour les interrupteurs d'une certaine puissance, cette façon de procéder a une grande importance. Les essais de pression doivent évidemment être faits à l'huile pour éviter la détérioration possible de l'isolement. Ce procédé donne en même temps une certaine probabilité d'éviter les accidents, lors d'un dépassement des valeurs d'intensité calculées.

Par contre, la première manière de résoudre le problème du facteur de sécurité revient à dire que l'exploitant soucieux de la sécurité de son service choisira un interrupteur d'un pouvoir de rupture plus grand que la puissance calculée de son réseau, c'est-à-dire un interrupteur d'un pouvoir de rupture de 300 000 kVA, s'il a trouvé par le calcul dans son réseau une puissance de 250 000 kVA.

Si, par contre d'après la deuxième façon de procéder, le constructeur a déjà prévu une sécurité, l'exploitant peut dans le même cas choisir un interrupteur de 250 000 kVA.

On voit donc que la puissance garantie d'un même appareil peut varier selon que l'on applique l'une ou l'autre méthode; c'est-à-dire que l'interrupteur comporte un facteur de sécurité ou n'en comporte pas.

Cette question qui se pose entre le fournisseur et l'exploitant est assez délicate. Nous faisons appel aux exploitants pour introduire,

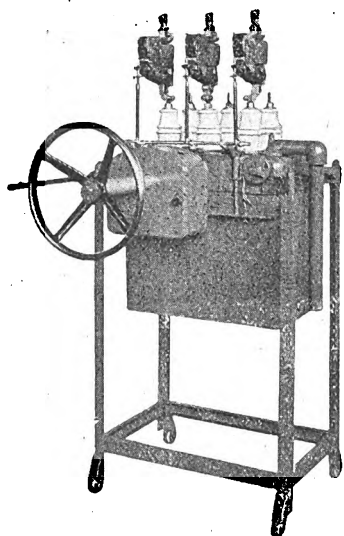


Figure 18.

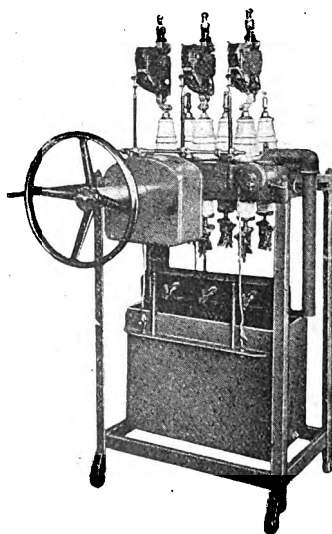


Figure 19.

dans leurs commandes d'interrupteurs à huile, la même netteté que l'on rencontre lors de la fourniture d'un alternateur ou d'une turbine. Ajoutons que nous sommes nettement partisans du facteur de sécurité introduit dans la construction de l'appareil même.

Si ces considérations sur la nécessité d'une réserve dans la conception des appareils ont leur valeur pour les puissances élevées, il n'y a pas de raison de ne pas en tenir compte pour des disjoncteurs d'une puissance et peut-être d'une importance plus faibles.

Certaines maisons ont fait récemment des efforts dans ce sens. Ajoutons qu'il suffit souvent d'appliquer des modifications insignifiantes pour augmenter largement la sécurité des appareils. Les figures 18 et 19 montrent un interrupteur garanti pour 60 000 kVA sous 12 000 V. Il a fallu soumettre cet interrupteur à une puissance de

120 000 kVA pour l'endommager légèrement, tel que le montre la fig. 20. Néanmoins, l'interrupteur a coupé et aucun accident ne s'est produit. La fig. 21 montre un interrupteur semblable, avant que les modifications n'aient été appliquées et coupant 30 000 kVA.

Si les accidents lors de l'ouverture sont connus, depuis longtemps, il n'en est pas de même des accidents causés par la *fermeture* sur

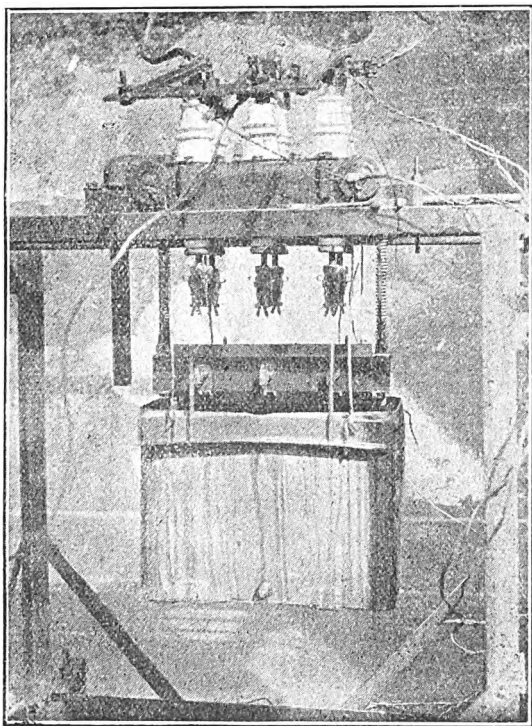


Figure 20.

court-circuit. Ce n'est que tardivement que les constructeurs ont commencé à s'en occuper. On peut néanmoins trouver aujourd'hui des constructions tenant compte de ces phénomènes. Citons, à ce sujet, les *contacts à solénoïde* qui présentent une première solution de ce problème. Une autre solution permettant de garder les avantages des doigts a été montrée tout à l'heure (fig. 13, *doigts adynamiques*). A partir des intensités pointe de 80 000 A, le problème de la *répulsion de la traverse* prend une importance prépondérante. Rappelons à ce sujet la fig. 14.

Presque tous les constructeurs prennent aujourd'hui des dispositions pour empêcher la *brûlure et la soudure des contacts principaux* à l'état enclenché, lors de court-circuits. Le moyen le plus souvent

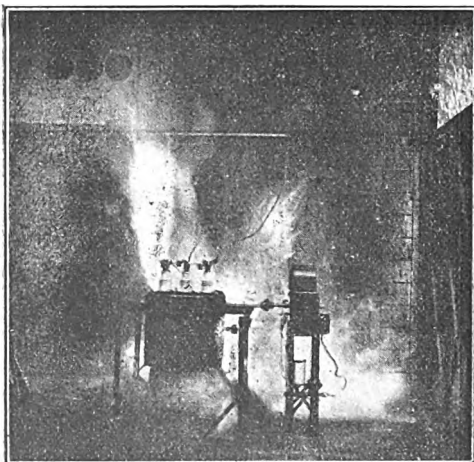


Figure 21.

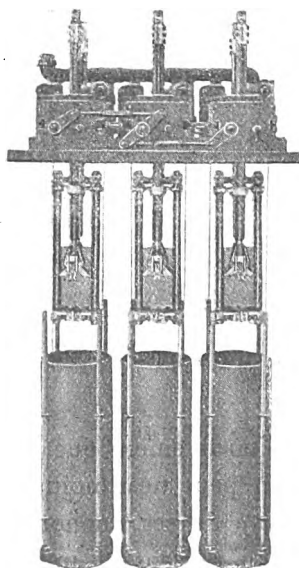


Figure 22.

employé est celui des balais renversés, tels qu'on les voit représentés dans la fig. 22, balais qui augmentent la pression sous l'effort de l'intensité.

Quant aux principes des appareils, on rencontre toujours les 2 systèmes : *rupture ouverte* et *pot d'explosion* l'un à côté de l'autre. Tous deux semblent présenter une solution du problème. On constate néanmoins que les constructeurs qui appliquent le pot d'explosion montent de plus en plus la limite à partir de laquelle ils appliquent ce dispositif, de sorte que son application commence à devenir rare pour des puissances inférieures à 200 à 300 000 kVA.

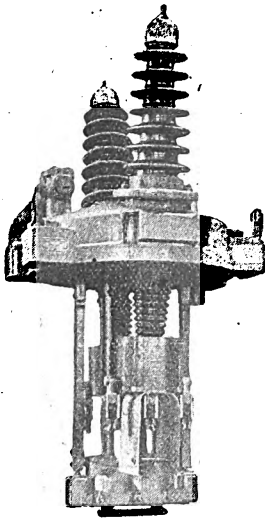


Figure 23.

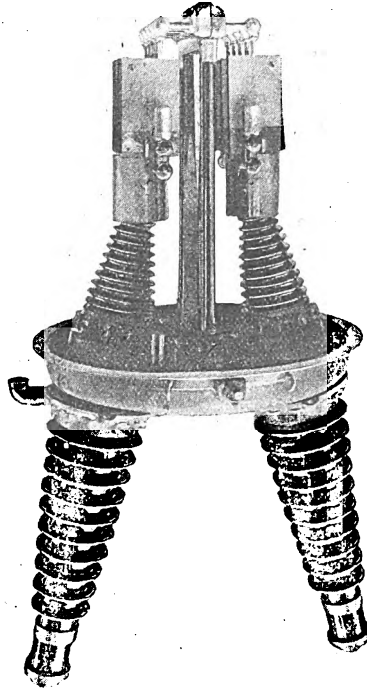


Figure 24.

Nous sommes nettement partisans de la rupture ouverte. Il est incontestable qu'elle présente une solution plus simple correspondant ainsi à une ligne de conduite que nous nous sommes posée partout dans la construction. Ce disant, nous ne voudrions pas contester qu'il est possible de construire de bons appareils d'après le système du pot d'explosion.

Pour les tensions plus hautes, à peu près à partir de 35 000 V, la *rupture multiple* est souvent appliquée (fig. 23 et 24). Elle constitue un moyen commode pour faciliter le problème de la rupture et d'atteindre dans un temps court la longueur d'arc élevée nécessaire à ces tensions pour couper.

En Europe, l'*interrupteur à bac unique* a toujours été employé pour les faibles puissances. Nous constatons, depuis quelques années, une tendance à adopter la forme du bac unique aussi pour des puissances plus élevées, et tout récemment même pour des tensions plus élevées.

Dans cet ordre d'idées, toutes les maisons européennes et récemment aussi les maisons américaines ont sorti des modèles jusqu'à 25 ou 35 000 V et pour quelques centaines de mille kVA. Jusqu'à environ

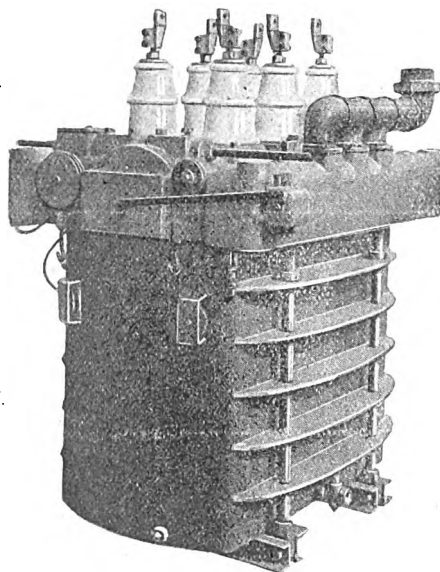


Figure 25.

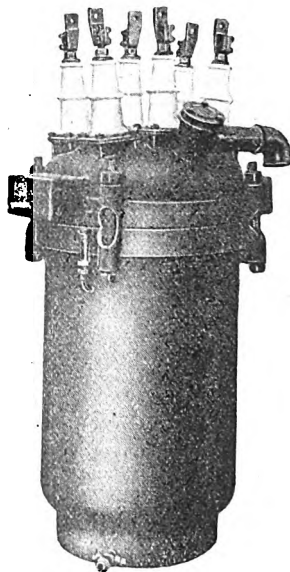


Figure 26.

300 000 kVA, ce type est parfaitement justifié. Sa sécurité est aujourd'hui la même que celle des types à bacs séparés.

La *forme extérieure des appareils* révèle chez tous les constructeurs, de plus en plus, l'appréhension des pressions produites par les arcs de rupture. La fig. 25 montre un bac renforcé par des nervures, la fig. 26 un bac rond, les deux avec fixation soignée de la cuve au capot. Les formes des interrupteurs se rapprochent donc de plus en plus de celles des chaudières (comparer également les fig. 27 et 28).

Le souci des contraintes dues à la pression et le souci de la sécurité conduisent de plus en plus à *construire en acier* les interrupteurs dépassant certaines dimensions, soit sous forme d'acier coulé ou d'acier embouti et soudé. La dernière façon de procéder assure en

même temps une très bonne utilisation de la matière et garantit la plus grande régularité possible de cette dernière. Elle a également

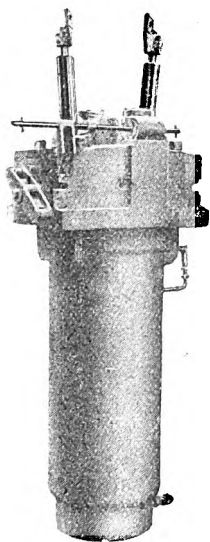


Figure 27.

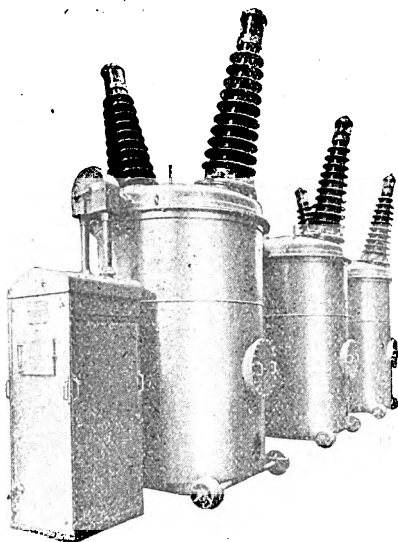


Figure 28.

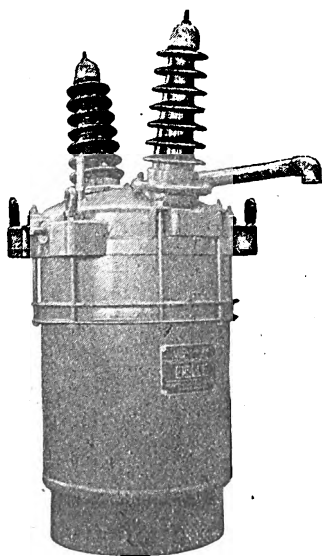


Figure 29.

l'avantage de diminuer considérablement le poids des appareils. La fig. 29 montre qu'on ne recule même pas devant des travaux de soudure relativement compliqués.

V. — TENDANCES DANS L'UTILISATION DES INTERRUPTEURS DANS L'HUILE

Si depuis longtemps déjà, il est possible de calculer avec une approximation suffisante les intensités de court-circuit, dans les réseaux, et les tensions en jeu lors de la rupture de ces intensités, le pouvoir de rupture des disjoncteurs, faute de données suffisantes, a été trop souvent soumis à des erreurs. Ces erreurs étaient importantes. Souvent le vrai pouvoir de rupture n'était qu'une faible fraction du pouvoir calculé et garanti.

Il est donc compréhensible que les exploitants soient devenus méfiants ; aussi choisissaient-ils souvent un type d'interrupteur quelconque sans se préoccuper de son pouvoir de rupture indiqué et en se basant uniquement sur leur expérience fatalement incomplète, et sans trop se soucier du développement ultérieur de la puissance de court-circuit en jeu dans leur réseau. Chaque agrandissement des centrales, chaque interconnexion avec d'autres réseaux conduisait donc à des accidents déplorables, dangereux mêmes pour la sécurité du personnel. Chaque fois se renouvelaient alors les mêmes soucis : remplacement des interrupteurs, cellules trop petites pour recevoir des appareils plus grands, d'où compromis sous forme de choix de disjoncteurs de nouveau trop faibles.

Aujourd'hui, les conditions ont changé. Les constructeurs ont créé un matériel pour tous les pouvoirs de rupture nécessaires à des prix abordables et avec des garanties qui ne sont plus illusoires. De plus, il existe aujourd'hui des définitions précises du pouvoir de rupture, ne prêtant plus à des malentendus.

On constate avec plaisir que les exploitants ont vite commencé à tirer parti de cette situation changée. Une tendance se dessine nettement à choisir les disjoncteurs conformément aux calculs des courants de court-circuit et des tensions de rupture, établis pour les réseaux en question.

Certains exploitants commencent même à aller plus loin et à installer des interrupteurs ayant un certain excédent de pouvoir de rupture en prévision des agrandissements futurs. Dans bien des cas, il est possible de tenir compte de l'intensité limite pouvant se produire avec n'importe quelle augmentation de la puissance installée des centrales et des interconnexions et de se pourvoir ainsi pour l'avenir.

Cela est possible dans le cas où il se trouve en aval de l'endroit considéré des selfs d'une certaine importance qui ne sont pas soumises à des modifications ultérieures, telles que par exemple, les transformateurs de sous-stations, les bobines de réactances protégeant des feeders, etc. Souvent ce principe de calcul du courant d'avenir limite peut s'appliquer à des cas, pour lesquels on ne l'aurait pas cru à première vue.

Signalons toutefois qu'il est toujours nécessaire de penser à l'avenir. Dans la plupart des cas, il sera justifié de dépenser davantage et d'installer un type d'appareil comportant une réserve de pouvoir de rupture.

Le développement décrit des constructions a eu également une influence heureuse sur le *réglage du retard des relais*. Trop souvent, les relais étaient réglés de façon à protéger l'interrupteur, c'est-à-dire avec un retard de plusieurs secondes pour profiter de la diminution de la tension et de l'intensité pendant le court-circuit (fig. 1). C'est en effet un moyen très efficace pour diminuer la contrainte des interrupteurs installés près des centrales. Seulement ces longs retards conduisent à une baisse de la tension dans tout le réseau, d'une durée incompatible avec les besoins de l'exploitation.

Nous constatons que l'on choisit aujourd'hui des interrupteurs tels qu'ils peuvent supporter le déclenchement « instantané », c'est-à-dire un déclenchement différé uniquement par le retard inhérent au mécanisme du disjoncteur.

Comme le montre la fig. 1, cela signifie néanmoins pour des court-circuits à proximité des centrales un abaissement de l'intensité et de la tension à environ 70 pour 100 de leur valeur initiale, c'est-à-dire, un abaissement à la moitié de la puissance.

On est allé tout récemment encore plus loin : Pour les superréseaux modernes, on a un intérêt primordial à maintenir, en cas de court-circuit, les grandes centrales en parallèle. Une solution de ce problème, mais pas la seule, est de *couper très vite*, c'est-à-dire en 0,2 s., compté à partir du moment de l'établissement du courant jusqu'à sa rupture. Cela nécessite des interrupteurs spéciaux : interrupteurs rapides.

Le problème se pose aujourd'hui surtout dans le cas de réseaux à très hautes tensions. Il entraîne évidemment une complication mécanique des appareils et ne devrait pas être appliqué sans une étude approfondie des conditions des réseaux en question.

En ce qui concerne l'*entretien des appareils*, on rencontre aujourd'hui beaucoup plus de soin. L'emploi d'interrupteurs ne permettant pas la révision des contacts sur place est de plus en plus prohibé.

Relativement au *montage des interrupteurs* dans les bâtiments, le montage dans les cellules s'ouvrant à l'extérieur trouve pas mal de partisans. Son avantage est de limiter les conséquences en cas d'accidents.

L'emploi de tubes d'évacuation des gaz conduisant à l'extérieur, si possible, est vivement à recommander. En effet, il n'est pas prudent de laisser des centaines de litres de gaz s'échapper dans la cellule.

VI. — INTERRUPTEURS SANS HUILE

Les accidents et incendies occasionnés par des disjoncteurs à huile mal construits ou mal choisis ont amené certains constructeurs à réétudier un vieux problème dont les premières réalisations datent du commencement du siècle : l'interrupteur sans huile.

Malheureusement, pour l'étudier, il était indispensable de disposer d'installations de recherches importantes. Ces dernières étaient attendues avec impatience par les Services de Recherches des différentes maisons. Cette question est une des raisons principales pour lesquelles la Station d'Essais à grande puissance, montrée dans la figure 16, a été construite dans un délai de 9 mois.

Mentionnons dans l'ordre chronologique les réalisations suivantes :

Disjoncteur à air sous pression de B.B.C. ⁽¹⁾.

Disjoncteur dans le vide décrit par Sorensen et Mendenhall ⁽²⁾.

Disjoncteur « Deion » de Westinghouse décrit par Slepian ⁽³⁾.

Disjoncteur à air sous pression A.E.G. Ruppel, décrit par Biermans ⁽⁴⁾.

Disjoncteur à eau S.S.W. décrit par Kesselring ⁽⁵⁾.

Nous assistons là à un travail de recherches admirable fourni par les constructeurs du monde entier.

La plupart des appareils ont été développés au point de pouvoir couper 2 à 300 000 kVA, en partie sous des tensions allant jusqu'à 100 000 V. Plusieurs appareils se trouvent en service d'essais.

(1) Vol. 17 (1930), page 63.

(2) A. I. E. E. vol. XLV (1926), page 1203.

(3) A. I. E. E. vol. XLVIII (1929), page 93.

(4) E. T. Z. (1929) volume 50, pages 1073 et 1114.

(5) E. T. Z. (1930) volume 51, page 499.

Il serait prématuré de donner des détails sur la construction de ces appareils qui sont en plein développement. Nous présentons seulement quelques figures montrant le fonctionnement de ces appareils.

La fig. 30 montre un appareil à air comprimé sous basse pression dû aux travaux des bureaux de recherches des Ateliers de Delle, appareil coupant 300 000 kVA sous 12 000 V avec une pression de 1,5 atmosphère. La fig. 31 montre l'oscillogramme s'y référant.

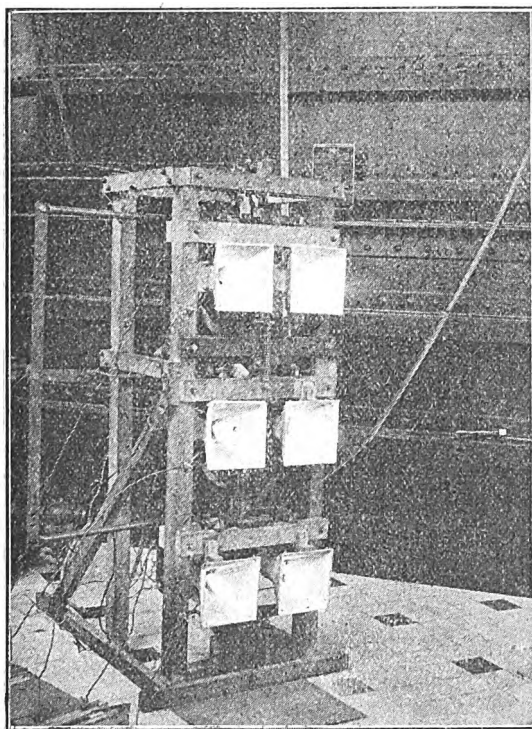


Figure 30.

Dans cet appareil, on applique le principe de rupture en 2 temps en intercalant d'abord une résistance. Ce principe, appliqué autrefois à l'interrupteur à huile, et abandonné à la suite des complications qu'il comportait, révèle des qualités tout à fait nouvelles, lorsqu'il est appliqué à l'interrupteur à air, grâce surtout à la facilité d'insérer les résistances par simple soufflage, sans complications mécaniques et grâce à l'absence d'isolateurs de traversées. La fig. 32 montre la coupure de la même puissance pour un appareil travaillant sans

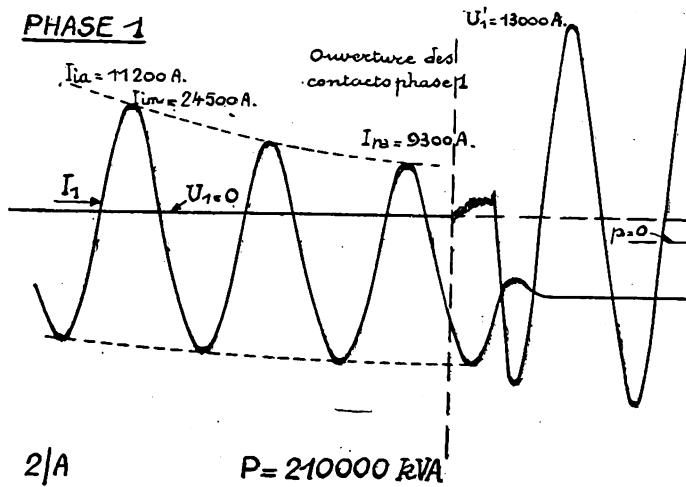


Figure 31.

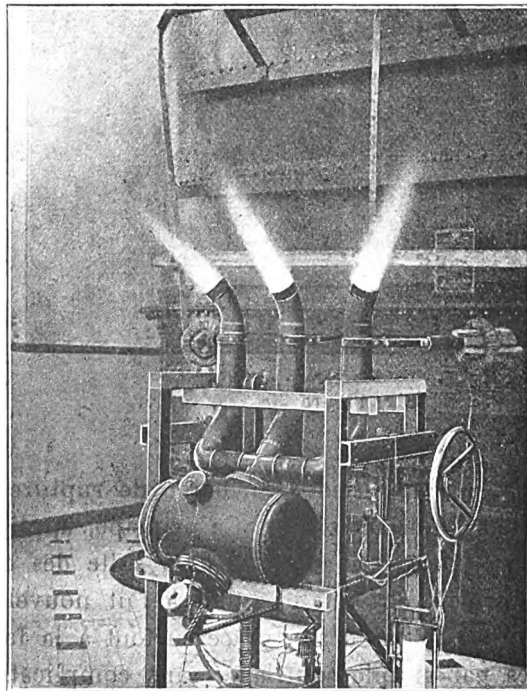


Figure 32.

résistances, avec rupture en un temps, mais sous 15 atmosphères. La fig. 33 représente l'oscillogramme de ce dernier essai.

L'introduction dans l'exploitation pratique d'appareils travaillant d'après des principes aussi nouveaux ne peut être faite qu'avec beaucoup de prudence. Entre autres, la question des ondes à front raide doit inciter à une certaine réserve. Aussi, ces phénomènes sans grande influence pour les interrupteurs à huile, peuvent empêcher les interrupteurs à air de fonctionner, si l'on n'a pas pris les précautions nécessaires. Il semble, par exemple, que ce soit cette influence qui provoque une grande différence entre la puissance de rupture

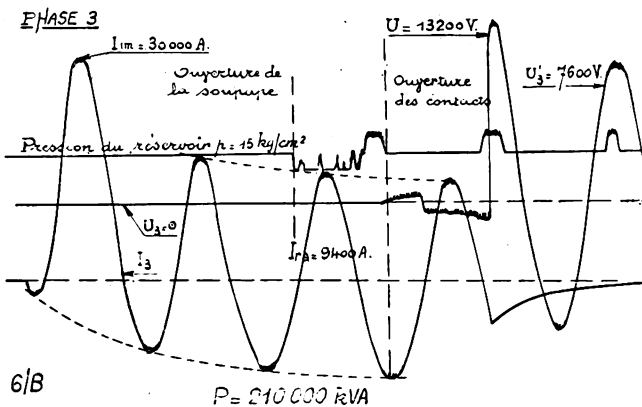


Figure 33.

en circuit monophasé et en circuit triphasé. En effet, un interrupteur coupant en unipolaire facilement 80 000 kVA sous 12 000 V a été avarié en coupant 18 000 kVA par pôle, également sous 12 000 V en court-circuit tripolaire, et cela dans des conditions identiques de pression et de vitesse. Néanmoins, les essais faits jusqu'à ce jour par différents constructeurs autorisent tous les espoirs.

Constatons que l'interrupteur à huile trouve un concurrent juste au moment où il commence à être mis définitivement au point. Ce n'est pas un simple hasard, puisque les mêmes Stations à grande puissance, qui ont permis l'étude des interrupteurs sans huile, ont contribué au perfectionnement des interrupteurs à huile, de sorte que ces derniers sont en train de devenir des appareils très sûrs. Ainsi qu'il a déjà été démontré plus haut, il est aujourd'hui possible de construire

des interrupteurs à huile d'une sécurité inconnue auparavant. Il ne restera, comme sources d'accidents pour les nouvelles constructions, que la rupture d'une pièce de mécanisme par suite de malfaçons, le mauvais entretien, ou l'installation, dans un réseau, d'interrupteurs de pouvoir de rupture trop faible.

Ce sont ces cas, malgré tout exceptionnels, qui donnent certaines chances au développement des interrupteurs sans huile, ces derniers, en cas d'accidents analogues ne pouvant donner lieu à des incendies.

LE RÉGLAGE DES FOURS ÉLECTRIQUES PAR VARIATION DE TENSION ⁽¹⁾

par M. Paul BERGEON

Professeur à l'Institut Electrotechnique de Grenoble.

Au lieu d'agir sur la résistance que le four oppose au passage du courant, comme on le fait ordinairement par le déplacement des électrodes, on peut très bien régler l'intensité ou la puissance en maintenant les électrodes fixes et en faisant varier la tension aux bornes du four.

On a en effet :

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

La réactance $L\omega$ d'un four étant pratiquement constante, pour maintenir fixe l'intensité I on peut donc agir soit sur la résistance R par le déplacement des électrodes, soit sur la tension U aux bornes du four.

Il en sera de même si l'on veut régler la puissance absorbée qui a pour valeur :

$$P = \frac{U^2 R}{R^2 + L^2 \omega^2}$$

En agissant sur la tension les électrodes peuvent donc être maintenues fixes, et doivent seulement être baissées de quelques centimètres une ou deux fois par jour pour compenser l'usure.

Ce nouveau mode de réglage, qui consiste à maintenir les électrodes fixes et à faire varier la tension aux bornes des fours a été imaginé par M. Paul MIGUET, Directeur général de la Société électrométallurgique de MONTRICHER, et par M. Marcel PIERRON, Directeur de l'usine de MONTRICHER de cette Société.

Pour faire varier la tension aux bornes d'un four, lorsque celui-ci n'est pas alimenté par un alternateur indépendant, ce qui est le cas général, on peut utiliser un régulateur d'induction qui permet d'obtenir une variation continue de la tension. Mais cet appareil, assez

(1) Ce rapport sera présenté au cours de la Semaine de discussions, le 25 novembre 1930.

employé autrefois pour le réglage des réseaux, coûte relativement cher et diminue le rendement. La véritable solution, malgré sa complication apparente dans le cas d'un four électrique qui exige un réglage très fin et très étendu, consiste à faire varier le rapport de transformation du transformateur desservant le four au moyen d'un coupleur manœuvrable en charge. C'est la solution que MM. MIGUET et PIERRON ont adoptée pour toutes leurs nouvelles installations.

Sans doute, l'idée de faire varier la tension aux bornes d'un four pour agir sur l'intensité ou sur la puissance n'est pas nouvelle. Dans les usines actuelles, tous les transformateurs d'électrochimie possèdent des prises multiples sur les enroulements primaires, destinées à faire varier la tension secondaire dans de fortes proportions. Mais la conception vraiment originale, qui fait que ce mode de réglage est particulièrement intéressant, c'est que dans les fours Miguet et Pierron les électrodes restent toujours rigoureusement fixes quelles que soient les variations de résistance du four et la puissance que l'on veut lui faire absorber tout au moins entre certaines limites.

D'autre part, dans les usines actuelles lorsque l'on fait varier la tension d'un four c'est pour augmenter ou diminuer la puissance qu'il absorbe, ou parce que l'on a changé de fabrication, mais jamais pour régler véritablement l'intensité ou la puissance, c'est-à-dire pour maintenir celles-ci constantes.

Les électrodes des fours ordinaires sont donc déplacées continuellement, tandis que celles des fours Miguet et Pierron sont maintenues fixes, c'est là une supériorité incontestable.

AVANTAGES DU RÉGLAGE PAR VARIATION DE TENSION

Ce mode de réglage présente des avantages importants que l'on peut résumer de la façon suivante :

Marche plus régulière du four. Il est évident, en effet, que les déplacements continuels des électrodes n'ont pas une influence favorable sur la fabrication, d'abord parce qu'ils facilitent la chute des matières premières dans le bain en fusion, et ensuite parce qu'ils empêchent de maintenir le plan de fusion au niveau qu'il faudrait pour que le trou de coulée soit toujours à une température favorable au perçage du four. Le but principal d'une électrode est évidemment d'amener le courant dans le four, mais l'électrode joue aussi un rôle important, que M. MIGUET paraît être le premier à avoir bien compris.

c'est d'empêcher les matières premières de se mélanger au bain en fusion, c'est-à-dire au produit fabriqué, et par suite de modifier sa composition. Seule une électrode fixe peut remplir convenablement ce rôle de protection et cela d'autant mieux que son diamètre est plus grand. Un four à électrode fixe donne donc des produits plus réguliers, surtout s'il est muni d'une grosse électrode.

Usure des électrodes réduite d'une façon sensible, d'au moins 30 pour 100, parce que celles-ci restent toujours bien entourées par le mélange à traiter, et que par suite les parties à haute température ne viennent pas au contact de l'air comme cela a lieu forcément avec le réglage par déplacement des électrodes.

Servo-moteurs beaucoup moins importants, surtout dans le cas des grands fours, car la commande des coupleurs peut être effectuée par de petits moteurs, tandis que la manœuvre de lourdes électrodes exige une grande puissance.

Possibilité de modifier instantanément et dans de fortes proportions la puissance absorbée par un four et de régler celle-ci, à distance, suivant les disponibilités d'un réseau.

Facilité beaucoup plus grande pour fermer complètement un four et recueillir ses gaz. La fixité de l'électrode dans le cas d'un four fermé, est non seulement intéressante pour réaliser le joint autour de l'électrode, mais aussi parce qu'elle permet d'obtenir, comme on l'a vu, des produits plus réguliers. Nous sommes persuadé que pour la fabrication du phosphore, seul un four à électrode fixe de grand diamètre sera capable de fournir comme sous-produit un ciment de qualité uniforme.

On peut reprocher à ce mode de réglage la complication des transformateurs à prises très nombreuses et des coupleurs en charge. Sans doute ces appareils sont d'une construction un peu délicate et la mise au point des coupleurs en charge a été assez longue. Mais les bons constructeurs peuvent donner actuellement toutes les garanties de bon fonctionnement et d'ailleurs des coupleurs en charge, moins importants, il est vrai, commencent à être très employés pour le réglage de la tension des réseaux. Ce sont maintenant des appareils normaux. Quant au supplément d'appareillage que nécessite ce mode de réglage, il est en somme relativement bien faible par rapport aux avantages dont on bénéficie et à l'importance des installations qu'il faut prévoir pour assurer le fonctionnement d'un four électrique.

Comme il faut nécessairement un coupleur par électrode, en employant deux fours monophasés montés en Scott sur un réseau triphasé, on peut, par rapport à un four triphasé, obtenir le même résultat au point de vue électrique, c'est-à-dire un bon équilibre des phases, avec seulement deux électrodes au lieu de trois. L'appareillage est alors plus simple et d'ailleurs l'installation plus avantageuse à bien d'autres points de vue.

Ce nouveau mode de réglage des fours électriques constitue un progrès très réel et présente un très grand intérêt pour les fours fermés dont l'emploi est appelé à donner un essor nouveau et considérable aux industries électrochimiques.

LA PROTECTION DES INSTALLATIONS A BASSE TENSION CONTRE LA FOUDRE ⁽¹⁾

par M. Charles LEDOUX

Ingénieur I. E. T.

I. — Introduction. — II. Accidents produits par la foudre sur les réseaux. — III. Etat actuel de la technique de protection. — IV. Protection complète. — V. Protecteurs J. D. L. pour branchements et installations intérieures. — VI. Conclusions.

I. — INTRODUCTION

Jusqu'à ces dernières années, les distributions d'énergie électrique à basse tension, n'avaient été qu'assez rarement le siège d'accidents dûs à la foudre. Le grand développement des réseaux à basse tension, et notamment des réseaux ruraux, a provoqué un accroissement notable de ces accidents.

Comment peut-on expliquer ces faits ? L'examen des conditions d'établissement et de développement des réseaux de distribution permet de le faire aisément.

En remontant à l'origine de l'installation des distributions d'énergie électrique, on s'aperçoit que seules les villes de quelque importance avaient ce privilège. Ces villes sont très généralement situées dans de vastes plaines alluvionnaires qui sont beaucoup moins souvent frappées par la foudre que les régions montagneuses où la nature géologique du sol est toute différente.

De plus, les lignes à basse tension des distributions urbaines sont ou souterraines ou placées en façade des maisons. De ce fait, elles se trouvent ou complètement ou fortement protégées. Le voisinage de nombreux paratonnerres, d'édifices ou de cheminées d'usines a également une influence qui permet aux villes de jouir d'une tranquillité relative.

L'électrification s'est d'abord poursuivie dans les plaines. Les conditions d'établissement des réseaux sont restées les mêmes que dans les villes quoique déjà un peu moins favorables.

La progression remarquable de l'électrification rurale au cours de ces dernières années, progression qui s'accroît chaque jour, a changé complètement la face du problème.

(1) Ce rapport sera présenté et discuté au cours de la Semaine de discussions de novembre, le jeudi 27 novembre.

L'électrification rurale commence à se développer dans des régions plus pauvres parce que plus montagneuses. Ces régions, et principalement celles où affleurent des massifs éruptifs fortement bouleversés, sont beaucoup plus sujettes à recevoir la foudre. De plus, les lignes tendues à travers les champs, c'est-à-dire bien dégagées, sont très fréquemment frappées.

Dans l'ensemble des pays, les accidents de personnes, dus à la foudre, augmentent progressivement avec l'électrification d'une manière impressionnante. Certaines régions sont particulièrement frappées. C'est ainsi que dans la Corrèze, où l'électrification n'est encore qu'à son début, les accidents augmentent dans une proportion effrayante : au cours de l'été 1929, la foudre, propagée par les lignes électriques, a provoqué treize accidents mortels et de très nombreuses commotions.

Ces faits, qui se sont reproduits à divers degrés dans d'autres régions, et en particulier dans le Massif Central, les Vosges, les Alpes, le Jura, les Pyrénées, ont effrayé les populations et jeté sur l'électrification un discrédit qui pourrait devenir dangereux pour son développement futur s'il n'y était remédié dans le plus bref délai.

Est-ce à dire qu'il n'y a point de remède ? Non.

Les populations et même quelquefois des ingénieurs, ont prétendu que la fréquence des accidents provient de ce que les réseaux ruraux sont mal construits. Là n'est pas la cause. L'expérience a montré que certains réseaux construits parfois en dépit du bon sens n'ont jamais été le siège d'accidents dus à la foudre, alors que des réseaux neufs, bien isolés donnent des ennuis.

Une seule cause demeure indiscutable, c'est la fréquence de chute de la foudre, qui peut varier dans des proportions très grandes selon les régions.

Nous supposons connu le mécanisme de la formation et de la propagation de la foudre dont la connaissance est nécessaire pour la compréhension de ce qui suit. On voudra donc bien, le cas échéant, se reporter à des études spéciales ⁽¹⁾.

(1) Voir en particulier :

G. C. Simpson. Phil. Trans. A. Vol. 209, p. 379-1009; Royal Society Proc. A. vol. 111, p. 56 (1926); Royal Society Proc. A. vol. 114, p. 376 (1927).

N. E. Dorsey. Journal of the Washington Academy of Sciences, février 1926. analysé dans la R. G. E., t. XX, p. 16, 3 juillet 1926.

C. Dauzère. La foudre et les lignes électriques. Bulletin S. F. E., n° 94, tome IX, juin 1929, p. 575.

C'est seulement par la collaboration des météorologistes et des ingénieurs qui étudient les phénomènes à des points de vue différents que peut être déterminée la solution complète du problème.

II. — ACCIDENTS PRODUITS PAR LA FOUDRE SUR LES RÉSEAUX

La conductibilité du sol est sans action sur l'éclair. La foudre frappe fréquemment le pied d'édifices élevés. Tout cela découle clairement du mode de propagation même de l'éclair. Si donc les masses conductrices placées dans le sol ou au-dessus du sol n'attirent pas la foudre, nous pouvons donc affirmer que les lignes électriques, pas plus que les paratonnerres, n'attirent la foudre, à moins que l'éclair ne passe dans leur voisinage immédiat.

Cette question a fait l'objet d'une importante discussion à la Société Météorologique de France ⁽¹⁾ au cours de laquelle tous les membres présents ont reconnu le rôle complètement passif des lignes électriques.

A vrai dire, la question ne devrait même pas être posée. Comment admettre qu'une ligne électrique située à une dizaine de mètres au-dessus du sol puisse exercer la moindre action sur un nuage orageux situé à 2 ou 3 000 m au-dessus ⁽²⁾.

Mais si les lignes électriques n'attirent pas la foudre, elles la reçoivent cependant pour leur plus grand dommage et elles la transportent à des distances souvent considérables multipliant ainsi le danger. C'est ce qui explique la multiplication des accidents dus à la foudre avec le développement de l'électrification rurale, les lignes à basse tension conduisant la foudre jusqu'à l'intérieur des habitations.

Les accidents variés provoqués par la foudre sur les réseaux à basse tension se produisent de diverses manières :

1° La foudre peut frapper les installations à haute tension (ou même les postes de transformation) avariant un transformateur et établissant un contact entre les enroulements haute et basse tension. Le cou-

(1) Voir compte rendu dans « La Météorologie » n° 52-54 de juillet-septembre 1929. Voir en particulier les remarques de M. Dauzère sur les points de chute de la foudre et celles de M. Ledoux sur l'action de la foudre sur les lignes électriques.

(2) L'observation d'orages en montagne prouve que la hauteur des nuages orageux au-dessus du sol est considérable. L'Observatoire du Pic du Midi de Bigorre, situé à 2.860 mètres d'altitude reçoit assez fréquemment la foudre de nuages situés très au-dessus de lui.

rant à haute tension est alors dérivé dans le circuit d'utilisation à basse tension, créant ainsi une source permanente de graves dangers, tant qu'il n'est pas interrompu. Ainsi donc, la foudre frappant une ligne à haute tension ne risque guère de provoquer directement des accidents de personnes; mais par des répercussions secondaires, elle peut faire courir un réel danger aux usagers, si des précautions sérieuses ne sont pas prises. Il importe donc de protéger les postes de transformation tant du côté haute tension que du côté basse tension ⁽¹⁾.

2° La foudre peut frapper le réseau de distribution à basse tension, ou les installations qui y sont reliées. Il y a généralement des dégâts locaux très marqués. De plus une partie des charges transportées par l'éclair demeure sur les lignes qui les transmettent jusque dans les installations particulières où elles produisent les effets si bizarres maintes fois décrits et malheureusement des électrocutions souvent mortelles.

3° La foudre peut frapper directement une ligne à haute tension et la faire tomber sur des circuits à basse tension établis sur les mêmes pylônes ou simplement à proximité. Les dangers sont alors les mêmes que dans le premier cas.

Les effets destructifs provoqués par la foudre varient énormément d'intensité. Tel poteau foudroyé est complètement déchiqueté, tel autre est à peine marqué. Tel conducteur de forte section est sectionné, tel autre de section plus faible ne porte même pas de trace.

Les isolateurs sont quelquefois détruits, leurs ferrures arrachées. Dans les installations intérieures, les fils sont parfois déguipés, les moulures arrachées, les compteurs, les appareils divers éclatent. Les lampes ont leurs filaments brisés (et non fondus) et parfois éclatent.

Dans l'ensemble ces effets destructifs sont manifestement dus à des efforts électrostatiques intenses. Les effets mécaniques sont de beaucoup plus importants que les effets thermiques. Il arrive cependant qu'un incendie prenne naissance à la suite d'un coup de foudre sur un réseau. On peut l'attribuer, la plupart du temps, à un court-circuit consécutif aux détériorations mécaniques des installations.

(1) Sur ce point on pourra consulter notamment :

Ch. Ledoux, Ondes Mobiles, propagation, formation, protection, Revue Générale de l'Electricité, t. XXI, p. 815-826, 865-871, 923-942, 983-1000, 1045-1066 et 1119-1128.

La protection des petits postes de transformation contre les surtensions (haute et basse tension). Conférence présentée au Groupe du Sud-Ouest de la S. F. E. le 13 avril 1929 (une brochure éditée pour les Etablissements D. Soulé).

Les électrocutions de personnes se produisent généralement par contact avec les installations, le contact étant direct ou produit par une étincelle qui assure la continuité du chemin de décharge à la terre.

Les charges transportées par les lignes électriques à l'intérieur des habitations sont faibles par rapport à la totalité des charges transportées par l'éclair. Ces charges sont fonction des caractéristiques des conducteurs.

Pour conduire la foudre au sol, il faut un conducteur de forte section, tel un câble de paratonnerre. Pour transmettre partiellement la foudre à l'intérieur des habitations, il suffit de conducteurs de faible section. C'est ce qui explique le grand nombre d'accidents que peut causer un seul coup de foudre. Mais cela nous donne par contre le moyen de réaliser d'efficaces installations de protection comme nous le verrons plus loin.

Ainsi, les lignes électriques augmentent dans une très forte proportion les dangers que présente la foudre dans les campagnes. Telle est la cause de la multiplication des accidents.

Il importe donc de protéger les réseaux et les installations particulières. Nous allons examiner ce qui a été fait jusqu'à ce jour dans ce but et ce qu'il y a lieu de faire pour redonner aux populations rurales la sécurité la plus complète.

III. — ETAT ACTUEL DE LA TECHNIQUE DE PROTECTION ⁽¹⁾

Il convient de rechercher dans la faible fréquence des accidents produits par la foudre dans les réseaux à basse tension, la pauvreté relative de la technique de protection de ces installations.

Alors que l'on dispose pour la haute tension de systèmes de protection variés et très efficaces : parafoudres, bobines de self inductance, bobines shuntées, amortisseurs de surtensions, condensateurs, on ne dispose encore pour la basse tension que de systèmes encore mal adaptés aux conditions spéciales auxquelles ils devraient répondre.

Dans un grand nombre d'installations anciennes, aucune précaution n'est prise contre la foudre.

(1) Ce sujet a déjà été, en grande partie, traité par tous : La protection des petits postes de transformation contre les surtensions (haute et basse tension), *loc. cit.*

Dans les installations actuelles, nombreuses sont celles qui comportent simplement une mise à la terre directe du neutre au poste de transformation (ou à l'usine pour réseaux à courant continu). Quelquefois, lorsque la mise à la terre veut être évitée, on intercale un parasurtension ou cardew.

Dans quelques cas, en plus de la protection du neutre (ou quand il n'y a pas de neutre), on place un jeu de parasurtensions ou de petits parafoudres sur les fils de phase au poste de transformation. Ces derniers étant presque toujours aériens dans les réseaux ruraux, les appareils de protection sont alors placés dans un coffret avec l'interrupteur de départ.

Parfois encore, mais malheureusement trop rarement, les exploitants placent par endroits sur leurs lignes quelques parafoudres ou parasurtensions. Cette pratique tend à s'étendre depuis ces quelques dernières années, en particulier, sur les réseaux où des accidents se sont produits.

En ce qui concerne la réalisation des appareils de protection proprement dits, peu d'innovations ont été faites durant ces dernières années. Seule la présentation a été améliorée. Toutefois, on peut considérer que pour l'usage auquel ils sont destinés (protection des lignes), ces appareils sont suffisants, quoiqu'il reste possible d'innover encore des réalisations plus pratiques et plus robustes.

Les parasurtensions ou cardews sont trop connus pour que nous les décrivions en détail. Leur présentation seule varie suivant les constructeurs.

Les parafoudres à basse tension comportent un intervalle d'air avec ou sans résistance de décharge en série. Quelquefois une bobine de soufflage leur est adjointe. Ils répondent à l'un quelconque des schémas de la fig. 1. Lorsqu'ils sont vraiment robustes, ils présentent sur les parasurtensions l'avantage de ne pas nécessiter de remise en état après qu'ils ont fonctionné. La fig. 2 représente un appareil, particulièrement simple, réalisé par les Ets. D. Soullé et comportant une série de disques en série constituant des intervalles multiples. L'extinction de l'arc amorcé s'opère par le seul fait que les vapeurs d'oxyde de zinc produites ne sont pas conductrices. L'appareil peut supporter un grand nombre de décharges. Il n'est pas nécessaire de placer de résistance en série.

Dans l'ensemble, on peut dire, sans exagérer, que la technique de la protection est encore rudimentaire en ce sens qu'il n'a à peu près jamais été fait d'installations méthodiquement organisées.

Nous ne saurions terminer ce chapitre, sans nous élever contre une

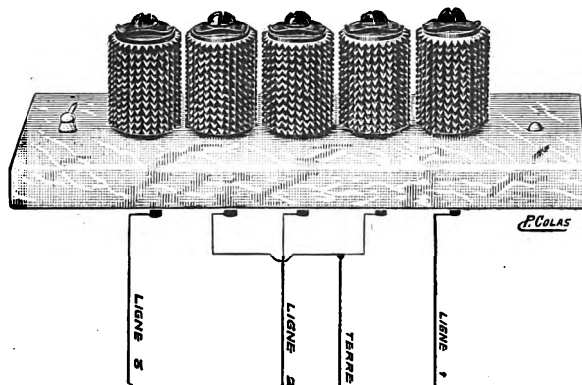


Fig. 1. — Parafoudre tripolaire sans résistances graphitiques

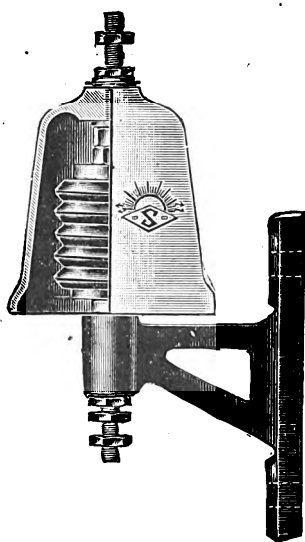


Fig. 2. — Parafoudre à intervalles multiples pour l'extérieur

idée qui tend à s'accréditer auprès des exploitants et qui n'est pas rigoureusement exacte : l'augmentation de l'isolement des réseaux augmente les risques d'accidents par la foudre. Il serait donc préférable de moins soigner l'isolement, les vieux réseaux à résistance d'isolement très faible étant moins dangereux que les réseaux neufs.

Tout d'abord, on doit remarquer que les conditions d'établissement des anciens réseaux ne sont pas les mêmes que celles des réseaux ruraux actuels.

De plus, il convient de distinguer entre les diverses sortes de dangers que présentent les installations électriques pour les usagers : dangers dus à la tension normale de service et dangers dus à la foudre.

L'augmentation de l'isolement général (lignes et surtout installations intérieures) diminue beaucoup les risques d'électrocution à la tension de service, mais, par contre, augmente peut-être un peu ceux dus à la foudre qui trouve moins aisément à s'écouler au sol.

La sagesse veut donc :

1° que l'on adopte un isolement élevé pour les installations à basse tension afin d'obtenir la sécurité des usagers relativement aux dangers dus à la tension normale de service et d'assurer la continuité de service ;

2° que l'on respecte rigoureusement la proportionnalité entre l'isolement des différents éléments d'une installation (postes de transformation, lignes, installations intérieures). En particulier, si l'on veut éviter que les installations intérieures constituent un point faible, elles doivent être établies avec un coefficient de sécurité au moins comparable à celui des lignes ;

3° que l'on ne laisse pas à la foudre le soin de rechercher elle-même les points faibles des installations pour s'écouler au sol, cette méthode étant trop dangereuse, mais que l'on crée, au moyen d'appareils de protection, des points faibles contrôlables judicieusement placés et de fonctionnement sûr.

On ne saurait assurer autrement la sécurité.

IV. — PROTECTION COMPLÈTE

Pour bien montrer l'esprit de notre méthode, imaginée en collaboration avec MM. P. JUPPONT et C. DAUZÈRE, nous allons nous placer dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire dans le cas d'une région très foudroyée. Dans ces conditions, voyons comment doit être conçue la protection pour quelle soit complète.

A l'heure actuelle, les procédés dont on peut disposer sont de deux sortes : les procédés préventifs et les procédés de protection proprement dits. Les premiers tendent à diminuer les probabilités de

chute de foudre sur les installations, les seconds tendent à limiter et à circonscrire les dégâts lorsque la foudre a frappé les lignes.

Avant tout autre chose, on doit éviter, en application de la théorie de M. C. DAUZÈRE sur les relations entre la foudre et la nature géologique du sol, d'installer des lignes et surtout des postes de transformation dans les lieux plus particulièrement susceptibles de recevoir la foudre. Il convient donc de rechercher, par examen géologique et par voie d'enquête, ces lieux dangereux. Toutefois, dans certains pays où la fréquence de chute est très considérable, il est souvent impossible d'obtenir ainsi une augmentation réelle de la sécurité, d'autant plus qu'on doit tenir compte des contingences locales et de la question économique : emplacement des habitations, des lignes à haute tension, etc. Malgré tout un emplacement judicieusement choisi permet quelquefois de jouir d'une sécurité relative.

Un procédé excellent consiste à généraliser l'emploi de paratonnerres. Il est possible d'en constituer de très simples et très économiques en plaçant un conducteur en fil de fer de 6 à 8 mm de diamètre, appointé et émergeant de 50 à 80 centimètres au-dessus de l'installation à protéger. En particulier, tout poste de transformation doit en comporter un. Il est également prudent d'en installer le long des lignes ou dans leur voisinage immédiat dans les endroits particulièrement menacés. Enfin les habitations situées dans les endroits dangereux ou considérés comme tels doivent être également protégées par des paratonnerres.

Un fil de terre tendu au-dessus des lignes, peut rendre de réels services, mais son coût assez élevé est encore plus sensible pour les lignes à basse tension que pour celles à haute tension. Toutefois, pour quelques tronçons de ligne traversant des endroits particulièrement aptes à recevoir des coups de foudre, son emploi doit être envisagé. La solution la plus radicale consiste à tendre au-dessus de la ligne un ou même deux fils de terre combinés à des paratonnerres. Malheureusement cette solution est encore beaucoup plus coûteuse.

Dans les distributions à courants triphasés 4 fils, il est plus simple de se servir du fil neutre placé en tête des armements comme fil de terre en le réunissant à de nombreuses prises de terre. Il est alors complètement inutile de l'isoler. La résistance de terre résultante correspondant à toutes les prises de terre en parallèle est très faible. Cette solution est très économique et très intéressante, mais ne peut suffire à elle seule car, d'une part, le neutre ainsi employé comme fil de terre

est plus particulièrement exposé à recevoir la foudre et, d'autre part, il pénètre dans les habitations. Il convient donc de la compléter. Néanmoins la protection ainsi obtenue est meilleure qu'avec le neutre isolé.

La mise à la terre des ferrures d'isolateurs présente quelque intérêt, mais le supplément de sécurité ainsi obtenu est bien faible, car la décharge par contournement des isolateurs est beaucoup moins probable que la décharge en un point quelconque d'une installation intérieure.

Les moyens que nous venons d'examiner ne manquent pas d'utilité, mais ne pourraient en aucune manière suffire à eux seuls pour obtenir une protection complète. Il est donc indispensable de recourir aux procédés de protection proprement dits, ces derniers étant appliqués rationnellement.

Un réseau de distribution se compose d'un certain nombre d'éléments constitutifs : postes de transformation, lignes (divisées elles-mêmes en un certain nombre de sections), branchements et installations intérieures.

Etant donné cette constitution, si un des éléments est atteint par la foudre, il peut réagir sur les autres. Il est donc indispensable de protéger chacun d'eux de telle manière que la foudre trouve toujours, dans le voisinage immédiat du point de chute, un chemin d'écoulement au sol beaucoup plus facile que celui consistant à suivre les lignes.

Nous devons donc envisager comme autant de problèmes à la fois connexes et distincts : la protection des postes de transformation, celle des lignes, celle des branchements, celle des installations intérieures. Pour chaque cas, il convient d'observer rigoureusement la proportionnalité entre les installations à protéger et les appareils de protection qui, sans être trop largement dimensionnés, doivent avoir, ainsi que leurs circuits de décharge, une capacité d'écoulement au moins égale à celle des circuits à protéger. L'observation de cette condition détermine trois types d'appareils : industriel pour les postes de transformation et les lignes ; de dérivation pour les branchements ; domestique pour les installations intérieures, chacun d'eux répondant à des conditions particulières.

La protection des postes de transformation doit être telle qu'elle pare à la fois aux dangers résultant de la foudre et à ceux résultant d'un

contact accidentel entre les enroulements à haute et basse tension qui peut être lui-même provoqué par une surtension due à la foudre.

En dehors de la protection des enroulements à haute tension que nous avons traitée dans d'autres études ⁽¹⁾ et que l'on réalisera de préférence avec des amortisseurs de surtensions, il convient de recourir simultanément aux dispositifs suivants :

1° Un paratonnerre simple réalisé comme nous l'avons indiqué lorsque les postes sont établis sur des poteaux en bois ou en béton et mise à la terre des pylônes si les postes sont métalliques avec une

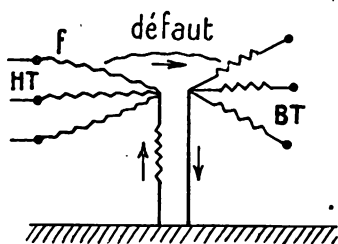


Fig. 3. — Protection contre les contacts accidentels entre les enroulements à haute et basse tension par mise à la terre des points neutres.

ou deux pointes de paratonnerre au sommet suivant la disposition. Les paratonnerres doivent être combinés avec le ou les fils de terre des lignes à haute et basse tension lorsqu'elles en comportent.

2° Neutre basse tension mis à terre directement. La mise à la terre directe du neutre basse tension combinée à la mise à la terre du point neutre haute tension directement ou avec une résistance intercalée est le seul moyen d'obtenir la mise hors circuit immédiate et certaine du poste en cas de contact entre enroulements à haute et basse tension (fig 3).

Les avantages du neutre isolé quant aux dangers d'électrocution à la tension normale de service et quant à la permanence de fourniture

(1) Ch. Ledoux, Ondes Mobiles. *Loc. cit.*

La protection des petits postes de transformation contre les surtensions. *Loc. cit.* Les inductances de protection contre les surtensions et les appareils qui en dérivent. Conférence présentée à Bruxelles à l'Association des Constructeurs de Matériel Electrique de Belgique le 15 mai 1929.

Les condensateurs de protection contre les surtensions. Conférence présentée à la Société Française des Electriciens à Toulouse le 6 mars 1928.

du courant sont illusoire dans une installation convenablement réalisée et entretenue.

3° Un jeu de parafoudres ou de parasurtensions sur chacune des phases entre l'interrupteur général et les départs. Cette disposition remplace dans une certaine mesure la mise à la terre du neutre dans les réseaux triphasés en triangle et monophasés dans lesquels il n'y a pas de neutre.

La protection des lignes doit être assurée par des parasurtensions ou des parafoudres échelonnés sur leur parcours, la protection réalisée étant d'autant plus efficace que le nombre de chemins d'écoulement offerts à la foudre est plus grand. Chaque section de ligne doit comprendre au moins un jeu d'appareils. Ainsi, lorsque la foudre frappe les lignes en un point quelconque, les dégâts sont limités à une section. La protection des lignes, liée à la continuité du fonctionnement des réseaux, est du ressort du distributeur et doit être assurée par des appareils du type industriel, simples et robustes, ne nécessitant qu'un minimum de surveillance.

La protection des branchements d'abonnés doit être telle qu'elle offre à la fois un obstacle à la propagation de la foudre vers l'installation intérieure et un chemin d'écoulement au sol. Elle doit comprendre, sur chaque fil, une bobine de self-induction et un parafoudre ou parasurtension placés à l'extérieur des maisons, à l'endroit où le branchement traverse le mur de façade. Ainsi la foudre frappant une ligne ou une dérivation ne risque pas d'étendre ses méfaits chez un nombre considérable d'usagers, car elle est immédiatement dérivée au sol en un grand nombre de points, à l'entrée même des installations intérieures. Le protecteur J. D. L. (JUPPONT, DAUZÈRE, LEDOUX) pour l'extérieur décrit au chapitre suivant remplit les conditions requises et est réellement adapté à cet usage.

La protection des installations intérieures doit être assurée par de petits parasurtensions répartis dans l'installation, de telle manière qu'ils constituent à la fois les points de plus faible isolement et les circuits les plus directs d'écoulement au sol. Ainsi la sécurité est assurée dans le cas peu probable où le protecteur extérieur ne réussirait à arrêter qu'une partie d'une décharge particulièrement violente, par exemple pour le cas où la foudre frapperait l'habitation elle-même. Le protecteur J. D. L. type intérieur, décrit au chapitre suivant, est spécialement adapté à cet usage.

Un réseau de distribution à basse tension protégé suivant notre conception répond au schéma de la figure 4 dont l'examen montre clairement que toute perturbation produite directement ou indirectement par la foudre est aussitôt circonscrite et réduite au minimum.

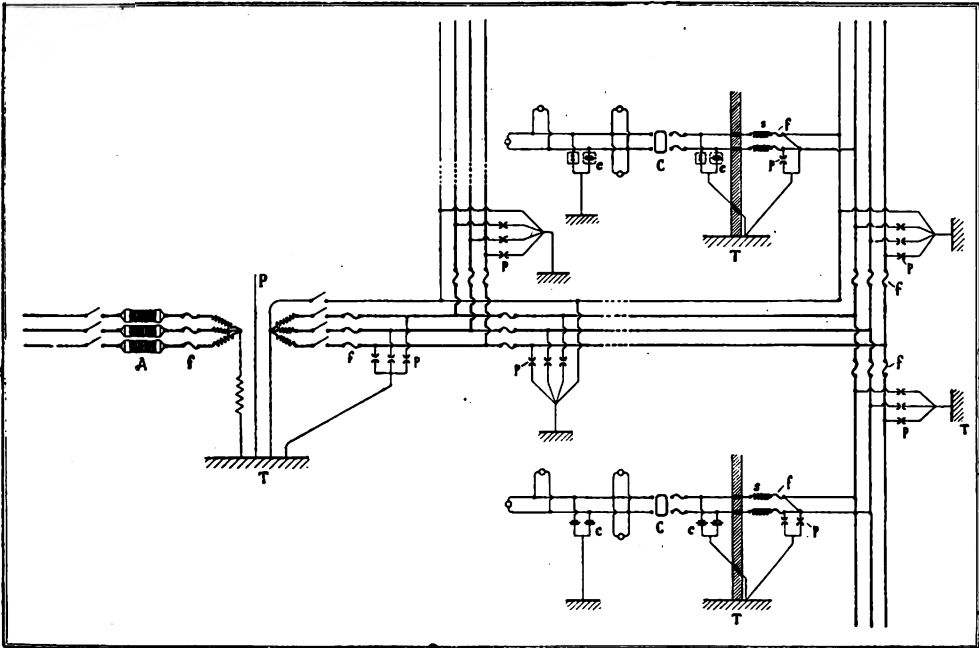


Fig. 4. — Réseau de distribution triphasé à basse tension avec protection complète contre la foudre et les contacts accidentels avec les installations à haute tension : 1° avec installation intérieure entre phase et neutre ; 2° avec installation intérieure entre phases : A. amortisseur de surlensions. — f. fusible. — P. paratonnerre. — p. parafoudre. — c. cardew ou parasurtension. — s. bobine de self-induction. — C. compteur. — T. terre.

V. — PROTECTEURS J. D. L. POUR BRANCHEMENTS ET INSTALLATIONS INTÉRIEURES

Les protecteurs J. D. L. sont capables d'assurer avec certitude la protection des abonnés contre tous les dangers résultant soit de la foudre, soit d'un contact entre les installations à haute et basse tension.

Les protecteurs J. D. L. pour branchement et pour installation intérieure sont solidaires l'un de l'autre et réalisent le schéma de la figure 4 (installation d'abonné). Ils ont pour effet :

1° d'assurer la mise à la terre du branchement par l'intermédiaire des parafoudres p ;

2° d'empêcher la propagation de la foudre vers l'installation intérieure grâce aux bobines s ;

3° d'assurer la mise à la terre de l'installation intérieure dès que

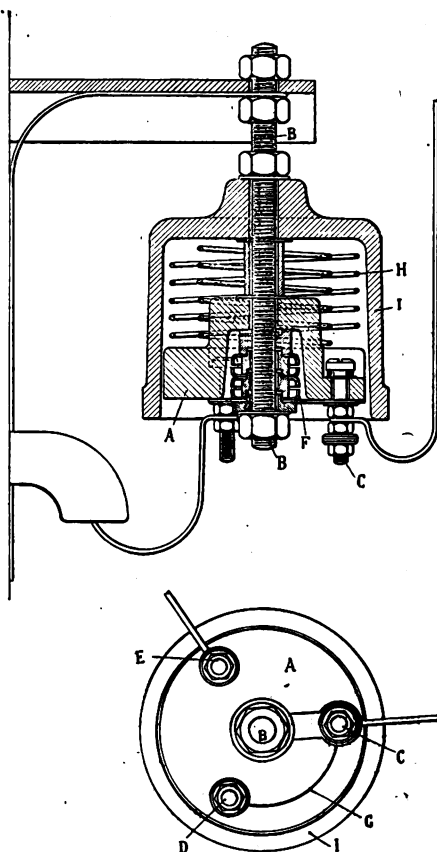


Fig. 5. — Vue en coupe d'un protecteur J.D.L. pour branchement d'abonné

la tension par rapport au sol augmente au-delà de la limite admissible, grâce aux cardews c et c' ;

4° d'assurer en même temps la mise hors-circuit de l'installation intérieure par fusion des fusibles f, fusion provoquée par le court-circuit résultant de la perforation des deux cardews c ou c'.

Ainsi donc la protection est complète et cela malgré le prix relativement très faible des protecteurs J. D. L. dont la réalisation est essentiellement pratique.

Le protecteur J. D. L. d'extérieur pour branchement est réalisé en unipolaire et constitué comme il est indiqué sur les figures 5 et 6. Une pièce en porcelaine A sert de support aux différents éléments de l'appareil. Elle est traversée par une tige filetée B qui sert de masse et assure la fixation de l'appareil. Elle porte, en outre, à sa partie inférieure trois bornes C, D, E, qui servent à connecter les différents éléments. La borne C est reliée au réseau, au parafoudre F et au

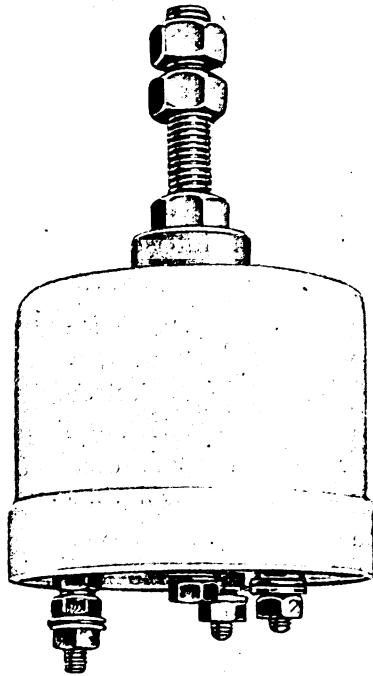


Fig. 6. — Vue extérieure d'un protecteur J.D.L. pour branchement

fusible G. Aux deux bornes D et E sont reliées les extrémités de la bobine de self-induction H à deux couches concentriques. La borne D est reliée, d'autre part, au fusible G, la borne E à l'installation intérieure. Une cloche en porcelaine I recouvre le tout et assure la protection des divers éléments contre les intempéries. Le parafoudre F est du type à intervalles multiples à disques de zinc. Il présente l'avantage de s'éteindre automatiquement, — les vapeurs d'oxyde de zinc n'étant pas conductrices, — et de fonctionner sans résistance de décharge.

Les divers éléments peuvent être vérifiés et remplacés très facilement. En particulier, si le fusible est fondu on s'en aperçoit aisément sans rien démonter. Le contrôle est donc extrêmement simple.

L'appareil est fixé en façade des maisons sur une ferrure quelconque réunie à une prise de terre simple. La fixation peut être faite à volonté au-dessous ou au-dessus de la ferrure. La cloche protectrice I peut porter un bossage et servir d'isolateur de descente. Dans ces conditions, l'appareil supprime à la fois le fusible de dérivation et l'isolateur de descente.

Lorsque le neutre de l'installation est mis à la terre en plusieurs points sur le réseau, on peut encore le réunir au sol à l'entrée même de l'installation et supprimer le parafoudre du protecteur J. D. L. dans lequel ne subsiste plus que le fusible et la bobine de self-induction.

Le protecteur J. D. L. pour intérieur est constitué ainsi que le montrent les figures 7 et 8 par un parasurtension très sensible monté dans un coupe-circuit à tabatière en porcelaine. Le parasurtension comprend deux plaques métalliques A séparées par une lame diélectrique mince perforée B. Les deux électrodes sont accrochées l'une sur l'autre avec interposition d'un isolant E qui les empêche de se toucher. Elles constituent ainsi un bloc robuste fixé sur le couvercle C de la tabatière au moyen des deux vis qui d'ordinaire fixent le fusible. Le socle D est constitué de manière à recevoir des prises arrières lorsque le protecteur doit être placé sur le panneau du compteur avant ce dernier ; l'appareil est alors absolument inviolable et peut être plombé. Le socle D est constitué de manière à recevoir des prises avant lorsque le protecteur doit être placé dans l'installation intérieure après le compteur.

Le protecteur J. D. L. pour installations intérieures peut être aisément vérifié et remplacé. Sa sensibilité est très grande et lui permet d'assurer la sécurité même lorsque les parafoudres des lignes et ceux des protecteurs de branchement, qui sont moins sensibles, n'ont pas fonctionné. Il est très avantageux, au point de vue de la permanence de service de reporter dans l'installation intérieure le protecteur le plus sensible, car une perforation a alors pour résultat de priver un seul abonné de courant et non l'ensemble du réseau.

Lorsque le fil neutre de la distribution est réuni au sol, il convient de placer un protecteur sur le fil de phase et sur le fil neutre un protecteur dans lequel on remplace le parasurtension par un conduc-

teur en cuivre (en aucune manière un fusible) qui réunit alors le neutre directement au sol tout en permettant la coupure à fin de vérification.

On a intérêt à placer des protecteurs J. D. L. non seulement sur

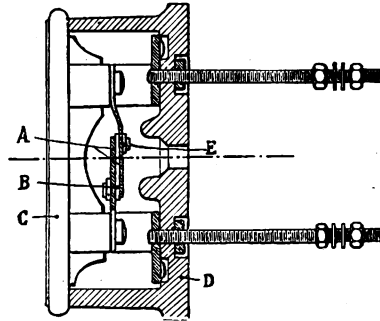


Fig. 7. — Vue en coupe d'un protecteur J.D.L. pour intérieur

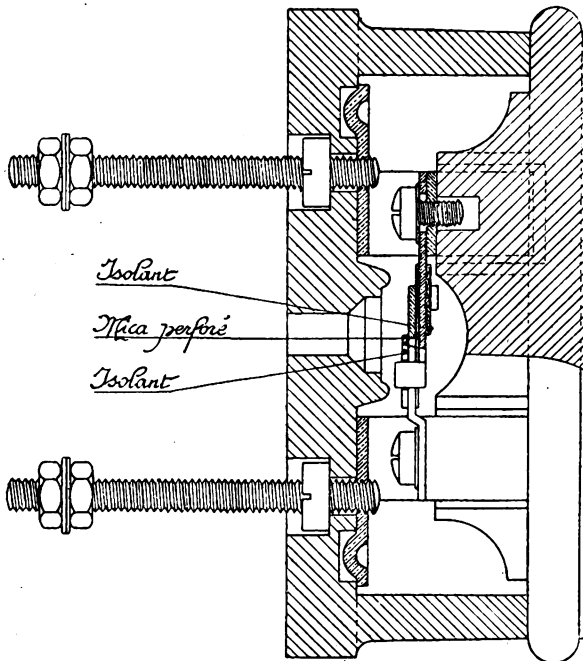


Fig. 8. — Protecteur J.D.L. pour intérieur

la planchette du compteur, mais aussi dans l'installation elle-même, en particulier aux points qui s'approchent du sol ou de conduites d'eau, ou, encore, dans les installations rurales, sur toutes les lignes qui sortent de l'habitation principale et alimentent les dépendances.

Ainsi qu'on peut en juger par cette description sommaire, les pro-

protecteurs J. D. L. sont constitués non seulement en vue d'assurer une protection complète dans tous les cas, mais aussi de manière à ne donner aucun ennui à l'exploitant dont ils n'augmentent pas la tâche de surveillance et d'entretien.

Leur prix très bas permet d'en généraliser l'emploi jusque dans les installations les plus petites, ce qui est très important, car la sécurité augmente avec la diffusion des appareils.

Les conducteurs reliant à la terre les protecteurs J. D. L. d'extérieur peuvent être en fil de cuivre nu. Leur section doit être supérieure à celle du fil constituant le branchement. Par exemple lorsque le branchement est réalisé en fil de 20/10, on prendra du fil de 30/10 pour le conducteur de terre. Le fil de fer galvanisé peut être utilisé à la condition que sa section soit suffisante pour qu'il résiste longtemps à l'oxydation.

Le conducteur reliant à la terre les protecteurs J. D. L. d'intérieur doit être en fil isolé pour toute la partie située à l'intérieur des habitations (isolement égal à celui de l'installation). Sa section doit être supérieure à celle du plus gros conducteur de la ligne au point de dérivation de l'appareil. Par exemple, dans une installation intérieure comprenant une ligne en fil de 10 ou 15/10, le conducteur de terre sera en fil de 20/10 isolé à 600 mégohms par km. Pour des raisons d'ordre mécanique on n'a pas intérêt à descendre au-dessous de 20/10. Ce conducteur peut être relié à la prise de terre des protecteurs du branchement. On le fera sortir le plus rapidement possible de l'habitation tout en lui donnant un parcours aussi rectiligne et vertical que possible.

Les prises de terre pour les protecteurs J. D. L. doivent être très simples. On devra s'efforcer de réaliser des prises en surface plutôt que des prises en profondeur, de manière à obtenir une bonne conductibilité superficielle, cette condition étant plus importante, pour écouler la foudre au sol, qu'une faible résistance.

VI. — CONCLUSIONS

Ainsi donc, la méthode et les appareils de protection que nous venons de présenter apportent la solution efficace et économique du problème de la protection.

Dans un réseau protégé, selon nos principes, la sécurité est aussi grande que possible et les accidents y deviendront tellement rares que les populations rurales oublieront rapidement les épreuves terribles que leur a infligé l'utilisation de l'énergie électrique.

Il est indispensable de réagir énergiquement contre cette idée que les installations électriques sont dangereuses par temps d'orage, car une installation convenablement protégée ne présente pas le moindre danger.

Il s'agit donc de généraliser le plus rapidement possible les méthodes de protection que nous venons d'exposer et non de recourir à des précautions plus ou moins efficaces qui peuvent jeter certain discrédit injustifié sur les applications de l'électricité.

Comme toujours, la sagesse consiste à prévoir. S'éloigner de l'installation électrique en temps d'orage est bien, mais il est infiniment préférable de rendre l'installation non dangereuse et de l'utiliser ensuite en toute quiétude.

La pratique consistant à couper le courant à l'approche d'un orage est inopérante et ne peut conférer de réelle immunité, la foudre se souciant fort peu de l'intervalle d'air constituant la coupure de l'interrupteur. C'est une méthode surannée, née de la peur, et qu'il convient de faire disparaître.

En un mot, tous les usagers, — et plus particulièrement les populations rurales, qui sont plus menacées, — ne doivent pas rechercher la sécurité dans des précautions plus ou moins efficaces, mais dans la protection efficace dont nous avons établi le principe et la réalisation pratique.

La mise en pratique de cette protection ne peut se faire intégralement que par la collaboration des pouvoirs publics, des distributeurs d'énergie électrique et des usagers.

Il appartient aux pouvoirs publics de déterminer, d'après les conditions particulières à chaque région, si notre système de protection doit être imposé ou si son application doit rester facultative. Il appartient aux distributeurs de protéger leurs installations (postes de transformation, lignes) et de procéder à l'installation et à la surveillance des protecteurs de branchement. Il incombe aux usagers de supporter la charge résultant de la protection des branchements et des installations intérieures. Cette charge est minime et constitue une assurance contre les dangers considérables dus à la foudre.

Ainsi la collaboration de la science pure et de la technique industrielle a créé une méthode et des appareils de protection qui permettent à l'usager de jouir des bienfaits de l'électricité sans avoir à redouter en contre-partie la multiplication des méfaits de la foudre.

LES ÉLECTROLYTES FORTS ⁽¹⁾

par M. R. DUFOUR

La théorie classique d'Arrhénius, fondée sur l'hypothèse de la dissociation électrolytique, ne donne qu'une représentation imparfaite de l'ensemble des phénomènes qui se passent dans les solutions conductrices de l'électricité. En particulier toute une classe d'électrolytes n'entrent pas dans le cadre de la théorie classique, malgré les efforts qui ont été faits pour atténuer par des corrections les écarts observés. Cette classe est celle des électrolytes forts.

Anomalies des Electrolytes forts.

Rappelons rapidement l'ensemble de faits qu'on a réunis sous le nom d'anomalies des électrolytes forts. Si on fait une liste des coefficients α de dissociation au sens d'Arrhénius, de tous les électrolytes, à la concentration $N/10$ par exemple, on constate ⁽²⁾ que ces nombres au lieu de se grouper autour d'une valeur moyenne, se répartissent plutôt en deux ensembles, les uns relativement petits et les autres voisins de l'unité.

Les électrolytes du premier groupe ont une faible conductibilité, ce sont surtout des acides et des bases organiques.

Les électrolytes du second groupe ont une conductibilité beaucoup plus grande, ce sont pour la plupart des acides forts minéraux, des bases fortes et des sels.

Si nous gardons provisoirement l'interprétation d'Arrhénius d'après laquelle le rapport Λ/Λ_∞ ⁽³⁾ est bien le coefficient de dissociation, nous pourrions dire que les électrolytes forts sont ceux qui fournissent des solutions concentrées d'ions, tandis que les électrolytes faibles n'en donnent pas puisque la dissociation est très faible pour une concentration équivalente un peu importante. Ainsi l'acide acétique $N/10$ est environ millinormal en ions des 2 signes.

(1) Communication présentée à la séance de la 3^e Section du 10 mai 1930, pour être discutée à la Semaine annuelle de discussion, le mardi 25 novembre 1930.

(2) E. Darmon, Bulletin de l'Union des Physiciens, octobre 1927.

(3) Λ conductibilité moléculaire.

Λ_∞ conductibilité moléculaire à dilution infinie.

Sous ce premier aspect il paraît bien y avoir 2 classes principales d'électrolytes.

Loi de dilution d'Ostwald

La loi d'action de masse appliquée à l'équilibre entre les ions et les molécules non dissociées conduit à l'égalité connue

$$\frac{\alpha^2}{(1 - \alpha) V} = K$$

où V est le volume équivalent.

Si on remplace α par Λ/Λ_∞ on obtient $\frac{\Lambda^2}{\Lambda_\infty (\Lambda_\infty - \Lambda) V} = K$ et on peut faire un tableau des valeurs de K pour vérifier qu'elles sont constantes.

Pour les électrolytes faibles tels que l'acide acétique on a le tableau suivant (tableau 1) :

ACIDE ACÉTIQUE

Concentration approchée	V en litres dilution	Λ	K. 10 ⁴
2,50	0,391	0,725	0,090
1,00	0,989	1,443	0,1405
0,25	3,954	3,221	0,1759
0,13	7,908	4,618	0,1814
0,06	15,816	6,561	0,1841
0,008	126,52	18,30	0,1847
0,002	506,1	35,67	0,1841
0,005	2024,4	68,22	0,1853
0	∞	387,9	—

Tableau 1.

K croît avec la dilution et finit par devenir en effet constant.

Pour les électrolytes forts comme KCl on a le tableau suivant (tableau 2) :

KCl et HCl

C	K (KCl)	K (HCl)
0,00001	0,00518	
0,0001	0,0147	
0,001	0,0474	0,189
0,01	0,1542	0,366
0,1	0,5052	
1,0	2,14	1,11

Tableau 2.

K décroît sans cesse quand la dilution augmente.

Les sels d'ions polyvalents donnent des variations encore plus accentuées.

Vis à vis de la loi de dilution, la distinction des électrolytes en forts et faibles se confirme donc, mais c'est par une anomalie fondamentale que les premiers se séparent des seconds, la loi de dilution n'étant valable pour eux dans aucun domaine de concentrations.

Nous sommes alors en présence des cas suivants : ou bien les élec-

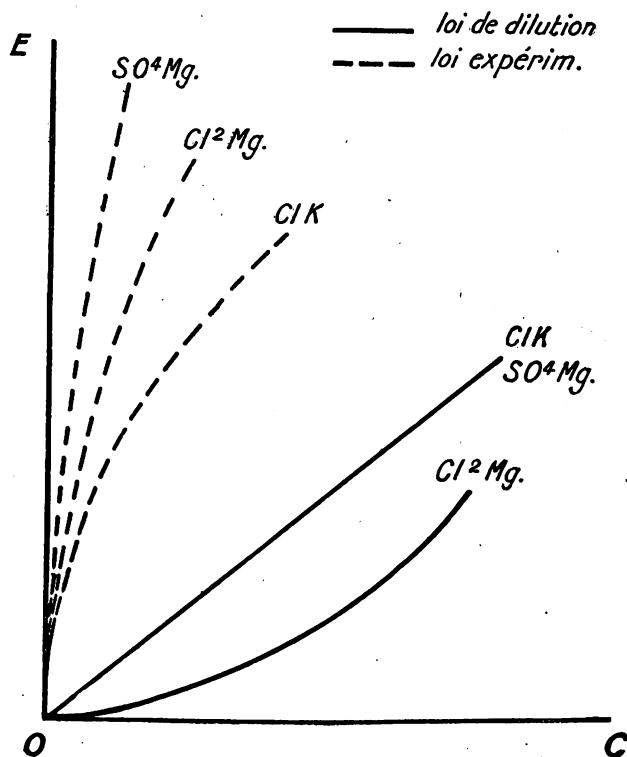
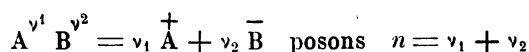


Fig. 1.

trolytes forts ne suivent pas la loi d'action de masse, traduite par la loi de dilution, ou bien α n'est pas égal à Λ/Λ_∞ , ou bien enfin l'anomalie totale s'explique par ces deux raisons réunies. Nous allons voir que c'est cette dernière hypothèse qu'il nous faut adopter.

Montrons d'abord qu'aux très faibles concentrations, la loi de dilution ne s'applique pas mieux qu'aux concentrations plus élevées.

Soit un sel de formule $A^{\nu_1} B^{\nu_2}$ se dissociant selon l'équation



soit C la concentration moléculaire et α le coefficient de dissociation. La loi d'action de masse donnerait

$$\frac{(\nu_1 C \alpha)^{\nu_1} \times (\nu_2 C \alpha)^{\nu_2}}{C(1-\alpha)} = \nu_1^{\nu_1} \times \nu_2^{\nu_2} \frac{C^{n-1} \alpha^n}{(1-\alpha)} = C^{10}.$$

Pour une dilution très grande α^n est voisin de 1 ; si on pose $1 - \alpha = \varepsilon$ on doit avoir $\frac{\varepsilon}{C^{n-1}} = k$.

Pour KCl et $SO_4 Mg$. $n = 2$ $\varepsilon = k C$. (droite)
pour $MgCl_2$ $n = 3$ $\varepsilon = k C^2$ (parabole)

La fig. 1 donne une comparaison des résultats expérimentaux et de la théorie.

La loi de dilution ne s'applique donc pas, même aux concentrations infiniment petites. Mais la loi d'action de masse devant de toute façon s'appliquer aux très faibles concentrations le résidu de l'anomalie doit être attribué à la deuxième cause ; α n'est pas égal à Λ/Λ_∞ .

Propriétés osmotiques.

Le rapport i de la pression osmotique réelle supposée mesurée par l'abaissement cryoscopique par exemple, à la pression osmotique théorique permet de mesurer un coefficient apparent de dissociation. Ce coefficient diffère sensiblement du même coefficient calculé par les conductibilités, et cela d'autant plus que la valence est plus élevée (tableau 3).

Mesures de la concentration des ions hydrogènes.

		α % C en millimol p. litre		
		20	50	100
KCl	P cry.	91,8	88,5	86,1
	Λ cond.	92,2	88,9	86,0
LiCl	P	92,8	91,2	90,1
	Λ	89,0	87,8	84,6
$MgCl_2$	P	88,15	85,4	83,9
	Λ	85,1	80,3	76,5
$CdCl_2$	P	76,8	69,0	60,5
	Λ	66,4	55,9	45,3
$SO_4 K^2$	P	85,7	78,5	73,0
	Λ	83,2	77,1	72,2
$SO_4 Cu$	P	45,5	31,8	—
	Λ	55,0	45,5	39,6

Tableau 3.

La mesure électrométrique de la concentration des ions H^+ conduit aussi à des valeurs de α qui diffèrent des précédentes, ainsi pour HCl N/10 on trouve

$$\Lambda/\Lambda_\infty = 0,925 \alpha = \frac{i-1}{n-1} = 0,917 \quad \alpha \text{ f. e. m.} = 0,823.$$

Dans le tableau 4 et la fig. 2 nous avons appelé f le coefficient apparent de dissociation tiré des mesures de force électromotrice, voir p. 1094 et suiv.

Outre ces propriétés qui conduisent à des valeurs différentes du

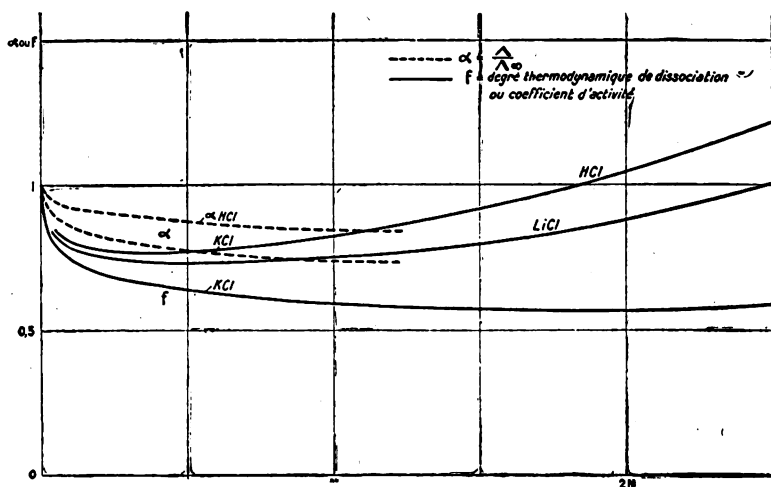


Figure 2.

coefficient α un certain nombre d'autres postulent une dissociation totale.

L'étude du coefficient d'absorption des sels d'ions colorés conduit à une valeur constante de α quand la concentration varie.

Enfin les solutions d'hydracides ont une tension propre de vapeur négligeable jusqu'à une concentration 3N environ, ce qui oblige à supposer l'absence de quantités notables de la forme non dissociée.

Dans l'application de la théorie d'Arrhénius à des domaines différents nous nous heurtons donc en tous sens à des difficultés importantes et même à des contradictions. Nous devons chercher si la théorie ne renferme pas en elle-même la cause de ces difficultés. La remarque suivante qui est à la base de la théorie de Debye nous conduit à une solution.

La théorie classique des ions dans un grand nombre de ses parties ne tient pas un compte suffisant de ce fait fondamental que les ions sont des particules chargées d'électricité. Ainsi les propriétés osmotiques des solutions électrolytiques sont déduites comme si les ions intervenaient comme des particules non chargées. La déduction thermodynamique des propriétés électromotrices souffre en partie de cet oubli. L'étude de la conductibilité enfin ne fait intervenir la charge des particules mobiles que d'une façon superficielle.

Il n'y a dès lors pas lieu de trop s'étonner des anomalies constatées et on peut espérer qu'un examen plus complet des propriétés électriques des solutions d'ions conduise à une représentation plus exacte des phénomènes.

C'est ce qu'a fait P. Debye.

Structure d'une solution d'ions

D'abord une solution d'ions n'est pas pareille à une solution d'un nombre égal de particules identiques aux premières, mais non chargées. Cette dernière solution supposée suffisamment diluée obéit aux lois des solutions idéales ; la première solution ne leur obéit pas et cette anomalie est le résultat d'une structure physique différente.

Alors que la solution diluée de particules non chargées est dans un état d'agitation thermique uniformément désordonnée, la solution d'ions présente une organisation particulière. Soit un ion positif sur lequel nous portons notre attention. Quand un autre ion positif s'approche de ce dernier puis s'en éloigne, il s'en approche moins vite et s'en écarte plus vite que si les deux particules n'étaient pas chargées. De même un ion négatif s'approche plus vite et s'éloigne moins vite que si les 2 particules n'étaient pas chargées. Il existe donc en moyenne un excès de charges négatives autour de chaque ion positif, et un excès de charges positives autour de chaque ion négatif. Cet excès de charges discrètes peut être assimilé à une densité continue en volume et le calcul conduit dans le cas de KCl par exemple aux expressions

$$\rho = \varepsilon n \left[e^{-\frac{\varepsilon \psi}{kT}} - e^{\frac{\varepsilon \psi}{kT}} \right]$$

première relation entre ρ et le potentiel ψ en un point donné de l'espace environnant l'ion considéré.

Dans cette équation ρ est la densité en volume, ϵ la charge de l'ion central, n le nombre d'ions de chaque signe par unité de volume, ψ le potentiel, k la constante de Boltzman, T la température absolue.

Quand $\frac{\epsilon \psi}{kT}$ est petit, l'expression de ρ se réduit à

$$\rho = - \frac{2 n \epsilon^2 \psi}{k T}$$

L'équation de Poisson donne alors

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = - \frac{4 \pi \rho}{D} = \frac{8 \pi n \epsilon^2}{D k T}$$

ou $\Delta \psi = \kappa^2 \psi$ avec $\kappa^2 = \frac{8 \pi n \epsilon^2}{D k T}$

D étant la constante diélectrique du solvant.

κ a une signification importante : $\frac{1}{\kappa}$ est la distance caractéristique à laquelle la densité est réduite à la fraction $\frac{1}{e}$ de sa valeur.

On peut l'appeler « épaisseur moyenne de l'atmosphère ionique ». Dans le cas où l'on a des ions d'espèces différentes de nombre n_i par cm^3 et de valence z_i on trouve pour la densité électrique autour d'un ion positif

$$\rho = \epsilon \sum n_i z_i e^{-z_i \frac{\epsilon \psi}{k T}}$$

et l'équation fondamentale devient au cas où $\frac{\epsilon \psi}{k T}$ est petit

$$\Delta \psi = \frac{4 \pi \epsilon^2}{D k T} \sum n_i z_i^2 \psi$$

avec

$$\kappa^2 = \frac{4 \pi \epsilon^2}{D k T} \sum n_i z_i^2 \quad \text{et} \quad \frac{1}{\kappa} = \sqrt{\frac{D k T}{4 \pi \epsilon^2 \sum n_i z_i^2}}$$

Ainsi l'organisation ou structure d'une solution d'ions peut être imaginée de la façon suivante.

Autour d'un ion de signe donné, les ions de signe contraire se trouvent en excès. Cet excès en un point est une fonction décroissante de la distance du point, au centre de l'ion. La distribution de la densité de charge électrique, autour d'un ion possède naturellement une symétrie centrale, les couches d'égale densité sont des sphères. La distance $\frac{1}{\kappa}$ à laquelle la densité électrique autour d'un ion est réduite dans le rapport $\frac{1}{e}$ est caractéristique du degré d'organisation de la

solution, elle a en effet pour expression dans le cas d'un sel tel que KOI (type uni-univalent)

$$\frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{D k T}{8 \pi n e^2}}$$

or, quand la température T augmente, l'agitation thermique augmente, le rayon moyen de l'atmosphère ionique augmente, et la densité électrique (qui tend d'ailleurs vers 0) tend aussi à devenir uniforme dans toute la solution autour de l'ion considéré. L'influence de l'électrisation des ions tend donc à s'évanouir quand l'agitation thermique augmente. De même le rayon moyen de l'atmosphère ionique est d'autant plus grand que la constante diélectrique D est plus grande. On sait en effet que dans un milieu de constante diélectrique D les actions électrostatiques sont réduites dans le rapport $\frac{1}{D}$. Enfin le rayon de l'atmosphère ionique est d'autant plus grand que l'expression $\sum n_i z_i^2$ est plus faible, c'est-à-dire que la solution est plus diluée et que les ions sont de plus faible valence.

D'une façon plus intuitive encore nous considérerons au lieu de $\frac{1}{\alpha}$ rayon moyen de l'atmosphère ionique, la grandeur α que nous appellerons « *degré de condensation* » de l'atmosphère ionique. Ce sera dès lors par ce degré de condensation qu'une solution d'ions se distinguera d'une solution idéale composée de particules non chargées et obéissant aux lois osmotiques classiques. Nous dirons donc en résumé : le degré de condensation est d'autant plus grand que la solution est plus concentrée, et que les ions présents sont de plus haute valence.

Le degré de condensation diminue quand la température s'élève, et quand la constante diélectrique du solvant augmente. Enfin le degré de condensation est le même pour tous les ions présents dans la solution, quels que soient leur signe et leur valence.

L'expression $\sum n_i z_i^2$ joue un rôle capital dans la théorie de Debye : on peut l'appeler *force ionique de la solution*. La force ionique d'une solution diluée d'ions ne dépend pas de la nature individuelle (chimique) des ions, mais seulement de leur nombre n_i et de leur valence z_i .

La force ionique intervient par sa racine carrée. Soit un électrolyte fort $A^{\nu_1} B^{\nu_2}$ dont les ions ont des valences z_1 et z_2 et soit C sa concentration moléculaire. On a, en supposant la dissociation complète,

$n_1 = C v_1$, $n_2 = C v_2$, la force ionique a pour valeur $C (v_1 z_1^2 + v_2 z_2^2)$. On voit donc, dès maintenant, que la racine carrée de la concentration moléculaire C jouera un rôle important dans la théorie.

Notons enfin que la condensation qui s'effectue autour d'un ion de signe donné ressemble à la condensation d'une suspension colloïdale, dans le fond d'un récipient sous l'influence de la pesanteur. Cette condensation est contrariée par l'agitation thermique et serait complète au zéro absolu. Elle obéit à la loi exponentielle du nivellement barométrique et permet de définir une hauteur moyenne à laquelle la concentration de la suspension est égale à la fraction $\frac{1}{e}$ de sa valeur au fond du récipient. Le champ de pesanteur remplace, dans ce cas, le champ électrique

Energie potentielle Electrostatique d'une solution d'ions

La résolution de l'équation classique :

$$\Delta \psi = \kappa^2 \psi$$

conduit à une expression du potentiel autour de chaque ion puis à l'expression de l'énergie électrostatique U_e emmagasinée dans la solution.

On trouve :

pour 2 ions tels que $\overset{+}{K}$ et $\bar{Cl}$

$$U_e = - \frac{N \epsilon^2 \kappa}{D}$$

N étant le nombre total d'ions $\overset{+}{K}$ ou $\bar{Cl}$ contenus dans la solution. Et pour plusieurs ions

$$U_e = - \frac{1}{2} \sum \frac{N_i z_i^2}{2} - \frac{\epsilon^2 \kappa}{D}$$

N_i étant le nombre total d'ions, de la sorte i , contenus dans la solution.

Si maintenant, au lieu de considérer les ions comme ponctuels on suppose qu'ils ont un certain rayon tel que 2 ions ne puissent s'approcher l'un de l'autre en deçà de la somme des rayons on trouve

$$\text{pour 2 ions } \overset{+}{K} \text{ et } \bar{Cl} \quad U_e = - \frac{N \epsilon^2 \kappa}{2 D} \left(\frac{1}{1 + \kappa a_1} + \frac{1}{1 + \kappa a_2} \right)$$

a_1 et a_2 étant les rayons des 2 ions

$$\text{t pour plusieurs ions } U_e = - \sum \frac{N_i z_i^2 \epsilon^2 \kappa}{2 D} - \frac{1}{1 + \kappa a_i}$$

Le signe — s'explique par le fait que la condensation s'accompagne d'une diminution d'énergie électrostatique.

Ceci posé, nous pouvons voir maintenant comment l'existence d'une telle énergie électrostatique, négligée dans la théorie d'Arrhénius, influe sur les propriétés thermodynamiques de la solution.

Laissons donc pour l'instant la question de la conductibilité qui en tant que phénomène irréversible ne se traite pas par la thermodynamique et prenons comme exemple la détermination théorique de la température de congélation d'une solution d'ions. Le problème consiste à calculer la température d'équilibre entre la solution considérée et une certaine quantité du solvant congelé. A cette température d'équilibre les deux phases peuvent demeurer indéfiniment en présence sans que l'une s'enrichisse aux dépens de l'autre.

Employant une méthode générale nous écrirons que le potentiel thermodynamique du système est minimum, c'est-à-dire que à la température considérée sa variation virtuelle est nulle. $\delta\Phi=0$.

Or, dans le cas qui nous occupe la température étant constante (celle de l'équilibre) ainsi que la pression extérieure, le potentiel thermodynamique a pour expression

$$\Phi = S - \frac{U + pV}{T}$$

où les lettres ont la signification suivante.

S entropie du système.

U énergie interne du système.

V volume total du système, p pression, T température d'équilibre.

Nous voyons alors que ce potentiel thermodynamique dépendant de U dépend aussi de U_e énergie électrostatique précédemment calculée, puisque U_e peut devenir une partie importante de l'énergie totale. Il n'est donc pas permis de négliger U_e comme le fait la théorie d'Arrhénius.

De même l'entropie totale S comporte une partie électrostatique qu'il n'est pas davantage permis de négliger.

Le potentiel thermodynamique du système en équilibre est la somme des potentiels des deux phases en présence. Ces potentiels se calculent aisément.

Pour une phase contenant uniquement des molécules non électrisées la thermodynamique classique donne (avec les notations de Planck) (1)

(1) Max Planck, Leçons de Thermodynamique 1910.

$$\Phi_{\text{classique}} \equiv \Phi_c = \sum_0^s N_i (\varphi_i - k \log c_i)$$

$N_0, N_1, \dots, N_s$ étant les nombres de molécules diverses contenues dans la phase et en particulier N_0 étant le nombre de molécules du solvant supposé en grand excès vis-à-vis des autres.

φ_i ne dépend que de p et de T , mais pas des N_i .

c_i concentration relative étant donné par :

$$\frac{N_i}{\sum_0^s N_j}$$

A cette partie classique Φ_c du potentiel thermodynamique on devra donc ajouter un terme d'origine électrostatique Φ_e dans le cas des ions, ce qui conduit tous calculs faits à l'équation

$$\Phi = \Phi_c + \Phi_e = \sum_0^s N_i (\varphi_i - k \log c_i) + \sum_1^s N_i z_i^2 \frac{\epsilon^2 \kappa}{3 D T}$$

le terme additonnel dépend, comme on le voit, de la racine carrée de la concentration par l'intermédiaire de κ .

Si maintenant on appelle Φ' le potentiel thermodynamique du solvant pur (congelé à la température T) la condition d'équilibre est

$$\delta(\Phi + \Phi') = 0$$

quand on donne aux N_i des variations virtuelles dN_i . On en déduit à la manière habituelle :

$$\frac{\Delta}{T_0} \frac{Q}{R T_0} = \sum_0^s c_i \left(1 - \frac{\epsilon^2 \kappa}{6 D k T} z_i^2 \right)$$

Q étant la chaleur moléculaire de fusion du solvant exprimée en unités de travail. T_0 étant le point de congélation du solvant pur et Δ étant l'abaissement de ce point de congélation.

Cette expression est très générale puisque les particules présentes peuvent être électrisées ou non. Dans ce dernier cas on a seulement $z_i = 0$ (valence nulle).

Si toutes les valeurs des z_i sont nulles on retombe sur la valeur classique Δ_c de l'abaissement du point de congélation pour un non-électrolyte.

$$\frac{\Delta_c}{T_0} \frac{Q}{R T_0} = \sum_1^s c_i$$

La loi de Raoult donne en effet $\frac{p_o - p}{p_o} = \frac{n_1}{n_o + n_1}$ pour une solution de molécules neutres, et la loi de Wanthof donne (Clapeyron)

$$\Delta_c = \frac{p_o - p}{p_o} \frac{R T_o^2}{Q} = \frac{R T_o^2}{Q} c_1$$

forme identique à la précédente.

Aux concentrations suffisamment petites pour que toute la théorie précédente reste valable et pour un seul sel dissous, on calcule un abaissement de Δ différent de Δ_c et tel que si on pose $\frac{\Delta}{\Delta_c} = f_o$ on ait

$$1 - f_o = W \frac{\epsilon^2}{6 D k T} \sqrt{\frac{4 \pi \epsilon^2}{D k T}} \times c \sum v_i$$

$$\text{avec } W = \left(\frac{\sum v_i z_i^2}{\sum v_i} \right)^{\frac{3}{2}}$$

en admettant que la molécule dissoute fournisse v_i ions de l'espèce i et que sa concentration par cm^3 soit c . L'abaissement Δ_c étant celui que produirait le même nombre de particules présentes, mais non électrisées.

L'examen de cette relation conduit aux lois suivantes vérifiées par l'expérience d'une façon satisfaisante.

1. L'écart relatif de l'abaissement réel à l'abaissement classique $\frac{\Delta_c - \Delta}{\Delta_c}$ est aux grandes dilutions proportionnel à la racine carrée de la concentration $\sqrt{c}$.

2. Cet écart est proportionnel à W coefficient de valence qui est d'autant plus grand que les valences des ions présents sont plus grandes.

Ainsi on a pour W les valeurs suivantes :

	K Cl	Ca Cl ²	Cu So ₄	Al Cl ₃	Al ₂ (So ₄) ₃
W =	1	2,83	8	5,20	16,60

3. L'écart est inversement proportionnel à la puissance $3/2$ de la constante diélectrique du solvant.

4. Dans les déductions précédentes on obtient l'accord avec l'expérience en supposant que les sels dissous sont entièrement dissociés.

Activité et coefficient d'activité.

Soit une solution dans l'eau ou un autre solvant de plusieurs substances non ionisables. Le potentiel thermodynamique à pression et température constantes a l'expression classique.

$$\Phi = \sum_0^s N_i (\varphi_i - k \log c_i,$$

les φ_i ne dépendant que de la température et de la pression. Si certaines molécules sont ionisables l'existence d'une énergie électrostatique emmagasinée conduit à l'expression

$$\Phi = \sum_0^s N_i \left(\varphi_i - k \log c_i + \frac{e_i^2 z}{3 D} \right)$$

$e_i = \varepsilon z_i$ étant la charge de la particule d'espèce i .

Comme il a été dit plus haut, quand on recherche l'équilibre entre deux phases, ou encore l'équilibre interne d'une seule phase dans laquelle peuvent se passer des réactions chimiques, on est conduit à calculer $\delta\Phi$, on trouve

$$\begin{aligned} \delta\Phi = \delta N_o \left[\varphi_o - k \log c_o - v_o \sum_i n_i \frac{e_i^2 z}{6DT} \right] \\ + \sum_1^s \delta N_i \left[\varphi_i - k \log c_i + \frac{e_i^2 z}{2DT} \right] \end{aligned}$$

posons

$$k \log f_o = v_o \sum_i n_i \frac{e_i^2 z}{6DT}$$

v_o étant le volume occupé par 1 molécule du solvant.

$$\text{et } k \log f_i = - \frac{e_i^2 z}{2DT}$$

l'expression de $\delta\Phi$ reprend alors la forme classique

$$\delta\Phi = \delta N_o [\varphi_o - k \log f_o c_o] + \sum_1^s \delta N_i [\varphi_i - k \log f_i c_i]$$

f_o et f_i sont appelés les *coefficients d'activité* du solvant et de la particule de sorte i .

Le produit de la concentration par le coefficient d'activité a reçu le nom d'*activité*. L'expression de $\delta\Phi$ reprenant la forme classique quand on y met en évidence les activités, on peut dire que *l'activité ou concentration thermodynamique est la grandeur qu'il faut mettre dans les conditions thermodynamiques classiques d'équilibre à la place de la concentration pour que ces dernières soient exactes.*

En particulier la loi d'action de masse $c_1^{\nu_1} c_2^{\nu_2} \dots = K$ qui n'est pas rigoureuse en général peut être remplacée par la loi

$$a_1^{\nu_1} a_2^{\nu_2} \dots = K$$

avec $a_i = f_i C_i$

On voit en outre que f_0 le coefficient d'activité du solvant est plus grand que 1 et que f_i est en général plus petit que 1, c'est-à-dire que du fait de la dissolution l'activité du solvant augmente et celle de la particule électrisée dissoute diminue.

Données expérimentales sur le coefficient d'activité.

Un ensemble important de données expérimentales publiées par G. N. Lewis en 1921 permet d'énoncer les lois suivantes :

1. En solution diluée le coefficient d'activité d'un ion donné dépend uniquement de la force ionique totale de la solution.
2. En solution diluée le log. du coefficient d'activité varie comme la racine carrée de la concentration moléculaire.

Ces 2 lois se trouvent entièrement vérifiées aux grandes dilutions.

Maintenant si l'on définit d'une manière générale l'activité d'une particule électrisée ou non, dans une phase solide liquide ou gazeuse comme la grandeur que l'on doit mettre à la place de la concentration pour que les conditions classiques d'équilibre thermodynamique soient vraies on voit que cette notion revêt une importance capitale. C'est elle qui intervient dans tous les équilibres thermodynamiques et dans les équilibres chimiques en particulier. Il importe donc de chercher dans tous les cas possibles à calculer et à mesurer les activités qui doivent le plus souvent remplacer les concentrations. Il convient en outre de s'habituer à l'introduction de cette notion dans les raisonnements où la notion de concentration jouait naguère un rôle important.

On peut dire d'une façon générale que chaque fois que les particules dissoutes peuvent être douées d'une quantité importante d'énergie autre que l'énergie thermique d'agitation, il y a lieu de remplacer la concentration par l'activité, les lois des solutions idéales cessant alors de s'appliquer. C'est en particulier le cas pour les solutions

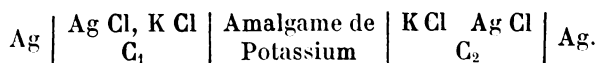
concentrées de particules non électrisées, les distances réciproques de ces particules étant telles que des forces importantes de gravitation par exemple puissent intervenir.

Il est à remarquer que dans le cas des ions les forces électrostatiques d'interaction deviennent déjà importantes à une concentration pour laquelle les autres forces de nature différente sont encore négligeables, et telles en un mot que si les particules n'étaient pas électrisées, les propriétés osmotiques de la solution, à cette concentration seraient celles des solutions idéales.

Mesure des coefficients d'activité.

A titre d'exemple montrons comment on peut obtenir l'activité des ions $\overset{+}{K}$ et $\bar{Cl}$ dans une solution de KCl, par une mesure de force électromotrice :

Réalisons une pile de concentration réversible et sans transport



La théorie classique donne pour la force électromotrice

$$E = \frac{2\ R\ T}{F} \log \frac{\alpha_1\ C_1}{\alpha_2\ C_2}$$

α_1 et α_2 étant les coefficients de dissociation de KCl aux concentrations C_1 et C_2 .

La théorie actuelle donne

$$E = \frac{2\ R\ T}{F} \log \frac{f_1\ C_1}{f_2\ C_2}$$

avec de plus l'hypothèse d'une dissociation totale.

On sait que si on donne à α_1 et α_2 les valeurs tirées des mesures de conductibilité $\frac{\Lambda_1}{\Lambda_\infty}$ et $\frac{\Lambda_2}{\Lambda_\infty}$ la première formule n'est vérifiée que lorsque α_1 et α_2 sont très voisins de 1.

La mesure de E permet de déterminer par la 2^e formule le rapport $\frac{f_1}{f_2}$ et si on part d'une première solution très diluée pour laquelle f_1 est égal à 1 on peut de proche en proche calculer les f_1 pour toute une série de solutions de concentrations c_1 . Les résultats sont consignés

dans le tableau 4 et la fig. 2. Dans ce tableau f paraît être égal à $\alpha = \frac{\Lambda}{\Lambda_{\infty}}$ pour les petites concentrations, mais en réalité les auteurs ont fait l'hypothèse $f = \frac{\Lambda}{\Lambda_{\infty}}$ pour la concentration initiale très petite au lieu de supposer simplement $f=1$.

Tableau 4.

C mol grammes p. 1000 g. d'eau	K Cl		LiCl		H Cl		K OH	
	f	α	f	α	f	α	f	α
0,001	0,979	0,979	0,976	0,976	—	0,990	—	—
0,003	0,943	0,968	0,945	0,962	0,990	0,986	0,982	0,980
0,005	0,923	0,956	0,930	0,949	0,965	0,981	0,975	0,975
0,010	0,890	0,941	0,905	0,932	0,932	0,972	0,961	0,963
0,030	0,823	0,914	0,848	0,899	0,880	0,957	0,920	0,939
0,050	0,790	0,889	0,817	—	0,855	0,944	0,891	0,925
0,100	0,745	0,860	0,779	0,834	0,823	0,925	0,846	0,910
0,200	0,700	0,827	0,750	—	0,796	0,909	0,793	0,891
0,300	0,673	0,807	0,738	0,759	0,783	0,903	0,769	0,889
0,500	0,638	0,779	0,731	—	0,773	0,890	0,765	0,884
0,700	0,618	0,761	0,734	—	0,789	0,874	0,772	0,879
1,000	0,593	0,742	0,752	0,641	0,829	0,845	0,786	0,877
2,000	0,572	—	—	—	1,040	—	—	—
3,000	0,586	—	1,164	0,458	1,402	—	—	—

L'examen du tableau conduit aux remarques suivantes :

1. f diminue d'abord à partir de 1, passe par un minimum et croît ensuite rapidement jusqu'à dépasser 1 (on a vu par la théorie $\log f < 0$ en solution diluée).

2. f varie avec la concentration d'une façon différente pour les différents électrolytes, sauf aux faibles concentrations.

3. α ne présente pas la même allure de variation que f (pas de minimum) et s'en écarte d'une façon considérable.

BIBLIOGRAPHIE. — P. DEBYE, *Physik Zeitschrift*, 1923, n° 9, p. 185 ; 1923, n° 15, p. 305 ; 1924, n° 5, p. 97. — G. N. LEWIS et M. RANDALL, *Journ. Amer. Chem. Soc.*, 1921, n° 43, p. 1112.

AUTOÉQUIRÉACTANCE ⁽¹⁾

par M. BENOIT,

Ingénieur à la Société des Grands Travaux de Marseille

L'appareil ainsi désigné est une self augmentant automatiquement sa réactance. de manière à protéger contre les surtensions, les surintensités et les déséquilibres, les distributions polyphasées dans lesquelles il se trouve inséré.

PROTECTION DES TRANSFORMATEURS CONTRE LES ONDES DUES AUX DÉCHARGES ATMOSPHÉRIQUES VENANT DES LIGNES HAUTE TENSION

Nous ne passerons pas en revue tous les dispositifs variés avec self, résistance et capacité, préconisés par chaque firme comme étant le

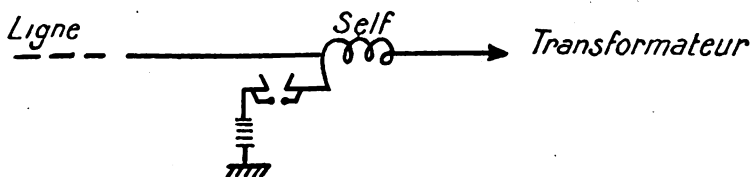


Figure 1.

seul répondant aux desiderata de l'exploitant, et nous n'envisagerons que celui qui, jusqu'ici, a semblé devoir être adopté tant au point de vue technique que pratique, c'est-à-dire constitué par un parafoudre et une self dite de protection.

Les parafoudres constitués essentiellement par des résistances à grand débit automatiquement mis en dérivation sous l'action d'une surtension fonctionnent bien, mais ils n'empêchent pas, à eux seuls, l'onde de ligne de perturber l'installation à protéger, et de déclencher dans un transformateur des oscillations dangereuses, ainsi que l'a montré M. J. Fallou dans son rapport à la conférence internationale des Grands Réseaux (23 juin au 2 juillet 1927).

(1) Communication présentée à la séance de la 4^e Section du 4 juillet 1930 pour être discutée à la Semaine annuelle de discussion, le jeudi 27 novembre 1930.

On sait, en effet, que tout changement dans l'impédance caractéristique $\sqrt{\frac{l}{c}}$ d'une ligne, y cause un *point de transition*, et qu'une ligne dont l'une des extrémités est mise à la terre peut recevoir, de ce point à la terre, des *ondes de retour* réfléchies, parfois aussi dangereuses que si la ligne était isolée (voir à ce sujet les travaux de M. Thielemans parus dans la Revue T.H.). Il est donc *nécessaire, même avec un parafoudre*, de protéger le transformateur par une *bobine de self*, celle-ci ayant d'ailleurs son utilité pour amorcer l'arc permettant le fonctionnement du parafoudre.

Il est clair que plus la self sera grande et meilleure sera la protection du transformateur (voir en particulier l'article de M. G. Courvoisier paru dans la R.G.E. du 27 octobre 1923, et les *Installations Electriques* de M. Mauduit). On est cependant limité, dans la pratique, beaucoup plus par la *chute de tension* et le *mauvais facteur de puissance* apporté par la présence d'une forte self, que par son prix de revient toujours faible par rapport à celui du transformateur à protéger.

Le but de l'autoéquiréactance est précisément d'introduire une self qui, bien que forte pour les ondes venant de la ligne, soit faible en régime normal.

Or, une onde de ligne est caractérisée par le fait qu'elle se *propage en même temps sur les trois fils*, de sorte que les développements sinusoïdaux de cette onde sont en phase, et se comportent comme des courants monophasés sur ces trois fils en parallèle, avec retour par le sol.

FONCTIONNEMENT DE L'AUTOÉQUIRÉACTANCE

Considérons maintenant, au lieu d'une bobine de self « *L* », un transformateur branché comme un transformateur d'intensité sur la ligne, les secondaires, de basse tension, étant directement reliés entre eux avec ou sans interrupteurs interposés (ceux-ci étant fermés normalement, s'ils existent).

Quand une onde, se propageant sur les trois lignes, arrive à ces trois transformateurs, elle les attaque sensiblement de la même façon, les tensions secondaires induites sont donc en phase, et aucun courant ne circule dans le secondaire qui peut être considéré *comme à circuit ouvert*.

Il en résulte que ce n'est plus, comme en régime triphasé équilibré, la simple self de fuite qui intervient, mais la self entière du primaire.

Si σ est le coefficient de Blondel relatif à ces transformateurs, nous allons, en effet, montrer que la self est multipliée dans ce cas par $\frac{1}{\sigma}$, c'est-à-dire que :

$$\frac{\text{Réactance en régime triphasé équilibré}}{\text{Réactance en régime monophasé}} = \sigma \frac{\text{fréquence normale}}{\text{fréquence correspondant à l'ordre du développement en série de Fourier de l'onde}}$$

Etude analytique d'un système de courants déséquilibrés à la pulsation ω avec superposition d'une onde perturbatrice à la pulsation ω' .

Remarquons d'abord, qu'à toute onde perturbatrice de tension V_1 , correspond une même onde de courant J_1 telle que si l'on désigne par l et c les selfs et capacités linéiques à la terre, on ait :

$$V_1 = J_1 \sqrt{\frac{c}{l}}$$

à la fréquence ω' .

Nous écrivons donc, suivant le théorème de Fortescue :

$$\begin{array}{l|l} \bar{I}_1 = \bar{I} + \bar{J} + \bar{J}_0 + \bar{J}_1 & \text{avec : } 1 + \alpha + \alpha^2 = 0 \\ & \text{ou : } \alpha = \frac{2\pi}{3}; \alpha^2 = +1 \\ & \text{étant entendu que :} \\ \bar{I}_2 = \alpha \bar{I} + \alpha^2 \bar{J} + \bar{J}_0 + \bar{J}_1 & \bar{I} \text{ est la composante symétrique directe,} \\ & \bar{J} \text{ » » » inverse,} \\ & \bar{J}_0 \text{ » » » monophasée.} \\ \bar{I}_3 = \alpha^2 \bar{I} + \alpha \bar{J} + \bar{J}_0 + \bar{J}_1 & \bar{I}, \bar{J} \text{ et } \bar{J}_0 \text{ est à la pulsation } \omega \\ & \text{et } \bar{J}_1 \text{ à } \omega'. \end{array}$$

Les pulsations étant différentes, il y a lieu d'opérer sur les équations différentielles elles-mêmes.

Désignons par r_1 et l_1 la résistance et la self primaire du transformateur de l'autoéquiréactance, r_2 et l_2 les quantités homologues secondaires, et M le coefficient d'induction mutuelle des deux circuits. Nous admettons que ces valeurs ne sont pas considérablement altérées par les fréquences différentes (en remarquant d'ailleurs que pour

un coup de foudre indirect à 100 km d'une extrémité de ligne, la fréquence de l'onde perturbatrice ne serait environ que de :

$$\frac{73.000}{100} = 730$$

correspondant à une harmonique 15 seulement).

En désignant par : $\overline{\Delta U}_1$, $\overline{\Delta U}_2$ et $\overline{\Delta U}_3$ les différences de tensions aux bornes du primaire, et par $\overline{U}'_1$, $\overline{U}'_2$ et $\overline{U}'_3$ celles du secondaire, on a :

$$\begin{aligned} \text{Au primaire} \quad & \left\{ \begin{aligned} \overline{\Delta U}_1 &= \left(r_1 + l_1 \frac{d}{dt} \right) \overline{I}_1 + M \frac{d}{dt} \overline{I}_1 \\ \overline{\Delta U}_2 &= \left(r_1 + l_1 \frac{d}{dt} \right) \overline{I}_2 + M \frac{d}{dt} \overline{I}_1 \\ \overline{\Delta U}_3 &= \left(r_1 + l_1 \frac{d}{dt} \right) \overline{I}_3 + M \frac{d}{dt} \overline{I}_1 \end{aligned} \right. \\ \text{et au secondaire} \quad & \left\{ \begin{aligned} \overline{U}'_1 &= \left(r_2 + l_2 \frac{d}{dt} \right) \overline{I}'_1 + M \frac{d}{dt} \overline{I}_1 \\ \overline{U}'_2 &= \left(r_2 + l_2 \frac{d}{dt} \right) \overline{I}'_2 + M \frac{d}{dt} \overline{I}_1 \\ \overline{U}'_3 &= \left(r_2 + l_2 \frac{d}{dt} \right) \overline{I}'_3 + M \frac{d}{dt} \overline{I}_1 \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

Mais les transformateurs ayant leurs secondaires réunis aux deux extrémités, impliquent les relations :

$$\begin{aligned} \overline{U}'_1 &= \overline{U}'_2 = \overline{U}'_3 = \overline{U}' \\ \overline{I}'_1 + \overline{I}'_2 + \overline{I}'_3 &= 0. \end{aligned}$$

Si donc on ajoute membre à membre les équations du deuxième système, on a :

$$3\overline{U}' = \left(r_2 + l_2 \frac{d}{dt} \right) (\overline{I}'_1 + \overline{I}'_2 + \overline{I}'_3) + M \frac{d}{dt} (\overline{I}_1 + \overline{I}_2 + \overline{I}_3) = 3M \frac{d}{dt} (\overline{J}_0 + \overline{J}_1)$$

ou :

$$\overline{U}' = M \frac{d}{dt} (\overline{J}_0 + \overline{J}_1).$$

En portant cette valeur de $\overline{U}'$ dans les équations du secondaire, on en tire :

$$\overline{I}'_1 = \frac{M \frac{d}{dt} (\overline{J}_0 + \overline{J}_1) - \overline{I}_1}{r_2 + l_2 \frac{d}{dt}}$$

$$\bar{I}_2 = \frac{M \frac{d}{dt} (\bar{J}_0 + \bar{J}_1) - \bar{I}_2}{r_2 + l_2 \frac{d}{dt}} \quad .$$

$$\bar{I}_3 = \frac{M \frac{d}{dt} (\bar{J}_0 + \bar{J}_1) - \bar{I}_3}{r_2 + l_2 \frac{d}{dt}}$$

et en portant ces valeurs dans les équations du primaire, on a :

$$\Delta \bar{U}_1 = \left[r_1 + l_1 \frac{d}{dt} - \frac{M \frac{d}{dt}}{r_2 + l_2 \frac{d}{dt}} \right] \bar{I}_1 + \frac{M \frac{d}{dt}}{r_2 + l_2 \frac{d}{dt}} (\bar{J}_0 + \bar{J}_1)$$

$$\Delta \bar{U}_2 = \left[r_1 + l_1 \frac{d}{dt} - \frac{M \frac{d}{dt}}{r_2 + l_2 \frac{d}{dt}} \right] \bar{I}_2 + \frac{M \frac{d}{dt}}{r_2 + l_2 \frac{d}{dt}} (\bar{J}_0 + \bar{J}_1)$$

$$\Delta \bar{U}_3 = \left[r_1 + l_1 \frac{d}{dt} - \frac{M \frac{d}{dt}}{r_2 + l_2 \frac{d}{dt}} \right] \bar{I}_3 + \frac{M \frac{d}{dt}}{r_2 + l_2 \frac{d}{dt}} (\bar{J}_0 + \bar{J}_1).$$

Si on désigne par σ le coefficient de fuite des deux enroulements (coefficient de Blondel), on sait que l'on a :

$$l_1 l_2 - M^2 = \sigma l_1 l_2.$$

De plus, on peut, au moins en première approximation, négliger r_1 et r_2 devant les termes $l_1 \frac{d}{dt}$ et $l_2 \frac{d}{dt}$ et écrire, en remarquant que :

$$l_1 - \frac{M^2}{l_2} = \sigma l_1$$

$$\Delta \bar{U}_1 = j\sigma\omega l_1 \left[\bar{I}_1 + \frac{1-\sigma}{\sigma} \left(\bar{J}_0 + \frac{\omega'}{\omega} \bar{J}_1 \right) \right]$$

$$\Delta \bar{U}_2 = j\sigma\omega l_1 \left[\bar{I}_2 + \frac{1-\sigma}{\sigma} \left(\bar{J}_0 + \frac{\omega'}{\omega} \bar{J}_1 \right) \right]$$

$$\Delta \bar{U}_3 = j\sigma\omega l_1 \left[\bar{I}_3 + \frac{1-\sigma}{\sigma} \left(\bar{J}_0 + \frac{\omega'}{\omega} \bar{J}_1 \right) \right].$$

Ceci montre que :

1° En circuit équilibré, ou même déséquilibré (mais sans accident à la terre) tel que : $J_0 = J = 0$, c'est-à-dire en marche de régime normal, la réactance de l'autoéquiréactance est : $\sigma\omega l_1$

Mais que :

2° Vis-à-vis des déséquilibres venant d'une mise à la terre $J_0 \neq 0$.

Ou :

3° D'une onde de perturbation atmosphérique : $J \neq 0$, la réactance a augmenté (automatiquement et sans faire appel à aucun moyen mécanique) de : $\frac{1-\sigma}{\sigma}$ vis-à-vis du courant de terre $\bar{J}_0$ et de $\frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{\omega'}{\omega}$ vis-à-vis de l'onde perturbatrice $\bar{J}_1$ c'est-à-dire que la self est multipliée pour les régimes troublés par le rapport $\frac{1}{\sigma}$ toujours au moins égal à 10.

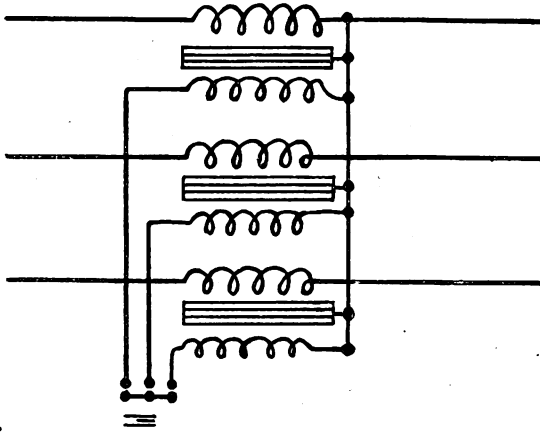


Figure 2.

REMARQUE

Afin de conserver à l'impédance caractéristique de l'autoéquiréactance sa valeur élevée, on devra prendre soin de l'isoler complètement de la terre, au moyen d'isolateurs ayant même distance à la terre que ceux supportant les conducteurs de ligne ; la mise à la terre du circuit magnétique et de la cuve seraient tout à fait défectueuses, car, en augmentant ainsi la capacité à terre de l'appareil elle en abaisserait d'autant l'impédance caractéristique.

Il peut même être intéressant à ce sujet de réunir électriquement la cuve et le circuit magnétique, ainsi que le secondaire, à la ligne haute tension elle-même (voir fig. 2).

Il convient également d'observer que les valeurs, tant de la résistance que des coefficients de self qui entrent dans le calcul, sont loin

de se comporter vis-à-vis des ondes qui les attaquent avec les valeurs qu'elles ont en régime permanent.

Ces valeurs sont, en effet, variables avec le point occupé par l'onde dans l'enroulement, au sujet duquel il y aurait lieu de tenir compte également des effets, non seulement de mutuelle induction des circuits entre eux, mais des spires entre elles, et de leurs capacités réciproques.

Mais le calcul dans ces conditions étant inextricable, nous n'avons tenu à présenter cet exposé que pour indiquer l'action auto-régulatrice de l'appareil utilisé en limiteur d'intensité, et en prévoir l'efficacité utilisé en para-surtensions.

VARIANTES

De ce dispositif on peut tirer deux variantes, qui semblent particulièrement intéressantes :

1° La liaison électrique par l'intermédiaire des secondaires est remplacée par une liaison magnétique seule, c'est-à-dire que les trois primaires sont bobinés sur le même circuit magnétique sans secondaires.

Le calcul montre que si l'on désigne par σ le coefficient de Blondel des galettes de phases différentes entre elles, le rapport précédent s'élève à : $\frac{6}{\sigma}$

2° Enfin, en combinant cette première variante avec l'idée fondamentale exposée plus haut, c'est-à-dire en couplant sur le même circuit magnétique les primaires et les secondaires de chaque phase, le calcul montre que ce rapport s'élève à une expression un peu plus complexe, voisine de : $\frac{12}{\sigma}$

Ceci met en évidence le grand avantage qu'il y aurait au point de vue self à coupler les trois transformateurs d'intensité étudiés plus haut, en série sur le même circuit magnétique (monophasé) celui-ci pouvant être relié électriquement à un conducteur de la ligne à haute tension, mais au point de vue de la capacité, il présenterait peut-être des inconvénients que, seule, l'expérience serait capable de discriminer, étant donné la difficulté qu'il y aurait à chiffrer les diverses capacités en présence.

CONCLUSIONS

Ainsi donc, la self apparente de l'autoéquiréactance peut facilement passer de la valeur 1, en perturbation, à la valeur $1/100$ et moins, en régime normal triphasé.

Cette self considérable, que l'on peut insérer d'une façon permanente en circuit, sans abaisser le facteur de puissance, ni provoquer une chute de tension appréciable, doit donc être considérée non seulement comme un appareil de protection, mais plutôt comme la meilleure et plus efficace partie des bobines de choc d'un transformateur l'utilisation pratique de ces bobines étant, comme il est facile de le démontrer, bien meilleure en autoéquiréactance qu'en bobine de choc même.

Il ressort de ce qui précède, les points suivants :

I. — *Etat de la question*

1° Les transformateurs doivent être protégés par des selfs (complément indispensable des parafoudres).

2° Les selfs constituées par les bobines de choc fonctionnent mal en tant que self. De plus, le champ électrostatique qu'elles laissent pénétrer brutalement dans les transformateurs y déclenchent des oscillations et des surtensions dangereuses.

3° Les selfs extérieures actuellement employées sont très insuffisantes, et leur utilité ne se fait sentir que sur les termes à haute fréquence provenant des développements en série de Fourier de l'onde incidente.

4° Il faut donc de fortes selfs, mais on est limité par la chute de tension, la consommation d'énergie réactive et le mauvais facteur de puissance que ces fortes selfs entraînent.

II. — *Autoéquiréactance. Protection des transformateurs.*

1° L'autoéquiréactance se comporte comme une self pouvant passer de sa pleine valeur vis-à-vis des ondes perturbatrices, à une valeur beaucoup plus faible ($1/10$ à $1/200$ environ) vis-à-vis du régime permanent.

2° Cet accroissement automatique de la self est quasiment instantané.

3° Il se fait également sentir *en cas de déséquilibre agissant ainsi en régulateur de charge.*

4° La surtension provenant de la réflexion des ondes incidentes se fait en dehors du transformateur, et les champs électrostatiques parasites ne troublent pas l'équilibre du transformateur.

Protection contre les court-circuits

Dans ce cas, il semble préférable d'adjoindre aux circuits secondaires des autoéquiréactances à transformateurs monophasés, *un interrupteur*, avec ou sans réenclenchement automatique, ouvrant ainsi les secondaires, sous l'action d'une surintensité, et ayant en courant alternatif un rôle analogue à celui des interrupteurs ultra-rapides en courant continu, c'est-à-dire qu'il peut permettre la coupure en deux temps, réduisant ainsi l'importance des disjoncteurs.

L'autoéquiréactance permet ainsi de réduire les courants de court-circuit et par conséquent de réduire les interrupteurs. Ceci est très intéressant pour les petites installations, surtout dans le cas de réseaux interconnectés dont le pouvoir synchronisant ne serait pas diminué, bien que la réactance, pour un court-circuit, soit considérablement augmentée.

VUE D'ENSEMBLE SUR L'EMPLOI DU MATÉRIEL AUTOMATIQUE DANS LES RÉSEAUX TÉLÉPHONIQUES RURAUX

par M. DI PACE ⁽¹⁾

Ingénieur en chef des P. T. T.

Intérêt de l'équipement automatique pour les réseaux ruraux

Parmi les avantages que présente à la Ville le téléphone automatique, l'un des plus appréciés par les abonnés est la possibilité d'avoir en permanence un service d'égale qualité. Dans les bureaux manuels la réduction du personnel aux heures de faible trafic, et en particulier la nuit, oblige à des attentes parfois assez longues. Avec l'automatique, au contraire, la communication, quelle que soit l'heure, ne demande que le temps de manœuvre du cadran d'appel.

A la campagne, dans le régime actuel, aux heures d'ouverture du bureau téléphonique, il est difficile d'avoir un service rapide, puisqu'il n'est pas possible en général de spécialiser un agent pour le téléphone et que l'opérateur qui en est chargé est souvent occupé ailleurs quand un appel se produit. Aux heures de fermeture du bureau, la nuit en particulier, le service est complètement suspendu et l'abonné ne peut obtenir aucune communication, sauf en cas d'urgence exceptionnelle, et moyennant des taxes supplémentaires assez élevées.

Dans les réseaux d'une certaine importance il est possible moyennant une faible redevance supplémentaire de laisser du personnel nuit et jour. C'est ainsi que depuis deux ans environ l'Administration française a rendu le service permanent dans les bureaux qui groupent un minimum de 200 abonnés. Mais pour les réseaux plus petits, une semblable mesure ne peut être envisagée : les frais de personnel seraient prohibitifs.

Le seul moyen pratique d'assurer la permanence du service dans les réseaux ruraux est donc d'y introduire l'équipement automatique.

Ce rapport sera présenté et discuté au cours de la séance de la 5^e Section de la Semaine de discussion le samedi 29 novembre prochain.

La plupart des Administrations téléphoniques ont commencé à faire appel à l'automatique rural, mais la forme sous laquelle il est employé diffère dans les divers pays en raison des caractéristiques particulières qu'y présente le trafic téléphonique rural.

Nature du trafic dans les réseaux ruraux

D'une manière générale, les communications des abonnés au téléphone d'un réseau quelconque peuvent être classées en 3 catégories :

1° communications locales ou urbaines destinées à des abonnés appartenant au même réseau que le demandeur ;

2° communications de voisinage, destinées à des abonnés de réseaux voisins ;

3° communications interurbaines à plus ou moins grande distance, destinées à des abonnés de réseaux éloignés de celui de l'abonné demandeur.

Dans les grands réseaux la majorité des communications appartient à la catégorie des communications urbaines, mais on constate que plus les réseaux sont petits, plus le nombre de ces communications diminue par rapport à celui des communications de voisinage et surtout des communications interurbaines, si bien que dans les réseaux ruraux on a très peu de communications locales, peu de communications de voisinage et une majorité de communications interurbaines.

L'automatique permet d'établir à la commande de l'abonné les communications locales et même les communications de voisinage et est d'autant plus intéressant que ces communications sont plus nombreuses, mais l'établissement des communications interurbaines nécessite l'intervention d'opératrices et par suite un central interurbain manuel. On trouve donc obligatoirement un central interurbain M dans tout groupement de réseaux téléphoniques ruraux, tous les bureaux A, B, C, etc. étant reliés à ce central soit directement, soit à travers d'autres bureaux (fig. 1).

Réseaux ruraux entièrement automatiques

Dans certains pays étrangers on ne crée un réseau téléphonique nouveau que si l'on peut compter sur un nombre d'abonnés suffisamment élevé pour donner lieu à un trafic assez fort. Chaque réseau dessert alors plusieurs communes et est relié en général directement

au centre interurbain du groupement, plus rarement en transitant par un autre bureau. Les centraux ruraux sont alors équipés en automatique et présentent en réduction la même constitution que les automatiques des grandes villes. Les postes d'abonnés sont munis d'un cadran d'appel, et le courant microphonique leur est fourni par une batterie centrale située au bureau automatique.

Quand un abonné a désire un autre abonné a' du même bureau A, il décroche simplement son appareil et le porte à l'oreille : dès qu'il entend le « signal de manœuvre », il compose sur son cadran d'appel le numéro du demandé ; si celui-ci est libre, il est sonné automatique-

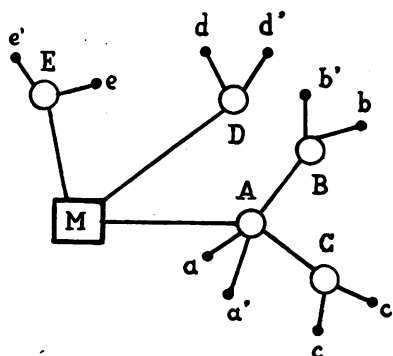


Figure 1.

ment ; s'il n'est pas libre, le demandeur en est avisé par un signal audible, raccroché et renouvelle ultérieurement son appel. Lorsque le demandé a répondu, le compteur du demandeur enregistre une unité et garde ainsi la trace comptable de la communication demandée et obtenue.

Si l'abonné a de A veut une communication de voisinage pour un abonné b desservi par un bureau B relié directement au bureau A, ou si un abonné b de B veut appeler un abonné c du bureau C, relié directement lui aussi à A, tout se passe de la même manière. Si la distance entre les deux centraux le justifie, le compteur du demandeur enregistrera deux unités au lieu d'une seule.

Pour une communication interurbaine, le demandeur compose un numéro spécial, ce qui allume une lampe d'appel devant une téléphoniste du central interurbain au centre de groupement. Celle-ci donne suite à la communication de la manière ordinaire.

Si enfin l'abonné demandeur a désire un abonné d d'un bureau D du même groupement que A, mais non relié à A par des circuits directs, la communication transite par le centre de groupement.

Ce transit peut se faire de deux façons : la première qui n'est possible pratiquement que si le centre de groupement possède lui-même un autocommutateur pour son trafic urbain, consiste à établir la communication d'une façon entièrement automatique sous l'action des impulsions du cadran du demandeur. Tout se passe alors comme si le groupement formait un seul grand réseau à plusieurs bureaux tous automatiques. La distance entre ces divers bureaux étant parfois considérable, des dispositifs automatiques de comptage des communications doivent permettre le comptage multiple d'après la durée de la communication et de la distance entre les bureaux. Il en résulte évidemment une complication assez grande des installations.

La deuxième façon d'assurer le transit des communications, fait intervenir une téléphoniste au centre de groupement, que celui-ci soit ou non doté d'un automatique. Le demandeur émet alors un numéro spécial qui le relie à cette téléphoniste ; celle-ci prend la demande et établit aussitôt la communication en appelant, à l'aide d'un cadran, l'abonné demandé. Les dispositifs de comptage sont très simplifiés puisque c'est l'opératrice qui détermine la taxation.

Systèmes ruraux semi-automatiques

Si dans un réseau équipé comme il vient d'être dit, la plus grande partie du trafic consistait en communications interurbaines, l'abonné rural émettrait le plus souvent sur son disque d'appel le numéro du bureau manuel et beaucoup plus rarement un numéro d'abonné ; on est donc conduit dans les cas de trafic local très faible à envisager la suppression du cadran d'appel de l'abonné et la mise en relation automatique de l'abonné appelant avec le centre manuel où l'opératrice prendra note de la demande et y donnera suite.

Au lieu d'un système automatique, on aura là un système semi-automatique.

Raccordements collectifs

A côté de ces systèmes automatiques ou semi-automatiques, il faut mentionner certains dispositifs utilisés dans des pays de montagne soit pour relier plusieurs abonnés habitant le long de la même vallée à

un central manuel situé au bas de celle-ci par un seul circuit, soit pour pouvoir desservir par le même circuit deux abonnés très éloignés du bureau central.

Dans le premier dispositif chaque poste d'abonné est muni d'un « sélecteur ». Les impulsions émises par le bureau central agissent sur tous les sélecteurs, mais seul celui qui correspond au numéro de l'abonné demandé reste en position de travail et connecte le poste d'abonné sur la ligne commune.

Le deuxième consiste à adjoindre à chaque poste d'abonné un dispositif comportant notamment un relais polarisé. Les deux relais étant de polarités contraires, il est possible de sélectionner l'un ou l'autre abonné par l'envoi d'un courant positif ou négatif.

La téléphonie rurale en France

L'Administration française des P.T.T. s'est, d'une manière générale, orientée vers le semi-automatique rural ; cela résulte des caractéristiques particulières des réseaux téléphoniques ruraux français.

Contrairement à ceux des pays étrangers où l'automatique pur est employé, les bureaux ruraux français ne desservent qu'une seule commune, et presque toutes les communes ont leur réseau ; les bureaux dans ces conditions n'ont qu'un très petit nombre d'abonnés, souvent un ou deux seulement, et sont reliés non à des centres importants, mais aux centres les plus proches qui existaient quand ils ont été créés ; le réseau général français est donc très ramifié ; pour atteindre le centre principal à partir d'un bureau rural, il faut appeler de proche en proche à travers deux, trois, quatre petits bureaux et parfois davantage ; le trafic total de ces petits bureaux est très faible et leur trafic local insignifiant. Ils ne pourraient donc justifier les dépenses qu'exigeraient soit l'installation de l'automatique complet dans chacun d'eux, soit la construction des lignes et des circuits nécessaires pour concentrer sur un certain nombre seulement de centraux relativement importants les abonnés des très nombreux bureaux actuels, afin de réaliser des installations automatiques rationnelles.

En ce qui concerne les bureaux eux-mêmes, l'emploi du semi-automatique est plus indiqué et conduit à des dépenses moins élevées. Quant aux circuits, pour éviter d'avoir à remanier complètement la configuration du réseau général et utiliser autant que possible les circuits existants, il est nécessaire de faire appel à des systèmes permet-

tant la retransmission automatique d'un appel à travers plusieurs bureaux échelonnés. Enfin, pour réduire les frais d'entretien des circuits et les difficultés résultant des défauts d'isolement qui sont particulièrement à craindre dans la campagne française où les lignes sont posées le long des routes qui sont presque toujours bordées d'arbres, il fallait des systèmes aussi indépendants que possible de l'état des circuits. Or, les systèmes à batterie centrale dans lesquels l'abonné est alimenté en courant microphonique par les accumulateurs du central à travers les fils de sa ligne, qui sont en permanence sous tension, sont très sensibles aux défauts des circuits et des lignes. Il est donc préférable d'envisager des systèmes à batterie locale dans lesquels le poste d'abonné est alimenté par une pile, les fils de ligne n'étant reliés à aucune source de courant.

Aucun des systèmes automatiques ou semi-automatiques existants ne remplissant ces diverses conditions, l'Administration française, après plusieurs essais de centraux automatiques ruraux de types existants, a établi, au début de l'année 1927, un programme des conditions à remplir, et invité les constructeurs que la question intéresserait à étudier un matériel satisfaisant aux différentes conditions posées.

Depuis trois ans, nombreux sont les constructeurs qui ont proposé des solutions ingénieuses de ce problème et auxquels l'Administration a passé des commandes d'essai. En 1929, deux groupements d'essais ont été mis en service, l'un à Mantes-Bonnières, l'autre dans les environs d'Orléans ; en 1930 a été mis en service le groupement de Coulommiers ; un autre, celui de Melun, commence actuellement ses essais ; d'autres suivront à Creil, Meaux, Etampes, Montereau, Pontoise, etc...

Les systèmes proposés emploient en général des matériels déjà connus, mais agencés suivant des schémas inédits. Leur ensemble constitue une nouveauté dans le domaine téléphonique.

Exploitation d'un groupement semi-automatique rural

Soit M un bureau comportant un central interurbain (fig. 2) et A une localité reliée à M par un ou plusieurs circuits ; à A sont reliées deux localités B et C. L'ensemble des bureaux A, B et C, reliés à M par le ou les circuits AM, forme le *Secteur automatique rural de A*. Autour de M on trouve plusieurs secteurs automatiques ruraux du

même genre. Leur ensemble constitue le *groupement automatique rural de M*. L'ensemble des abonnés de M et du groupement est au moins égal à 200, si bien que, conformément à la règle indiquée plus haut, il est possible de maintenir en permanence du personnel dans le bureau M.

Appel du centre manuel par un abonné rural

Tout abonné b du réseau B possède un appareil à batterie locale muni d'une magnéto. Pour appeler, il donne quelques tours de magnéto sans décrocher son appareil. Un courant alternatif parcourt ainsi la ligne d'abonné b-B et actionne au bureau B un relais d'appel

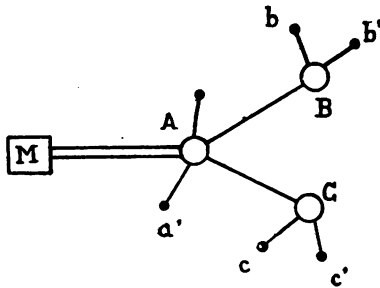


Figure 2.

sensible au courant alternatif. Celui-ci met en jeu un dispositif formé soit uniquement par des relais, soit par des relais et des organes rotatifs qui fait passer en position d'appel le circuit B-A. De ce fait, celui-ci agit dans le bureau A comme la ligne d'abonné b-B avait agi en B et fait passer en position d'appel un circuit A-M. Une lampe d'appel s'allume au bureau manuel M et alerte une opératrice.

La transmission de l'appel entre le poste d'abonné et le bureau qui le dessert est donc provoquée par un courant alternatif. Entre B et A et A et M, suivant les systèmes, elle est provoquée soit par un courant alternatif, soit par la mise à la terre d'un fil normalement à la batterie à chaque extrémité, soit par la mise à la batterie d'un fil à la terre à l'autre extrémité.

L'opératrice répond à l'appel en enfonçant une fiche dans le jack dont la lampe s'est allumée et envoie un courant d'appel sur le circuit appelant. Ce courant, soit directement, soit après avoir été relayé dans les bureaux A et B, fait fonctionner la sonnerie de l'abonné

demandeur. Celui-ci décroche alors son appareil, se trouve en présence de la téléphoniste et formule sa demande.

En principe, on peut avoir un nombre quelconque de bureaux entre le demandeur et le centre manuel. En pratique, on limite le nombre à trois pour limiter l'« affaiblissement » entre le poste d'abonné et le centre manuel en vue de permettre le service dit « universel », c'est-à-dire de donner à un abonné quelconque la possibilité d'avoir, dans de bonnes conditions d'audition, une conversation avec un autre abonné quelconque du territoire.

Si l'appel de l'abonné b ne trouve pas de circuit B-A libre, il est enregistré ou plutôt emmagasiné, ce qui n'avait jamais été réalisé antérieurement dans des installations de ce genre : le relais d'appel de l'abonné b reste dans ce cas en instance d'appel ; quand le circuit B-A est libéré, l'appel est transmis en A sans autre intervention de l'abonné. Là aussi, si tous les circuits A-M sont occupés, l'appel reste en instance jusqu'à ce qu'un circuit devienne libre ; il est alors transmis au centre manuel.

Si l'abonné b désire une communication avec un abonné du bureau M ou un bureau manuel éloigné, ou un abonné d'un autre secteur, l'opératrice établit la communication avec un dicorde. Elle est avertie de la fin de la communication du côté manuel par la lampe de fin ou de supervision suivant le type du bureau manuel et, du côté automatique, soit par une lampe de supervision qui s'allume quand l'abonné rural raccroche son poste, soit par une lampe de fin qui s'allume quand l'abonné rural, ayant raccroché, donne quelques tours de magnéto comme signal de fin.

Appel d'un abonné rural par l'opératrice du centre manuel

Quand l'opératrice désire appeler un abonné de A, elle insère la fiche d'un dicorde dans le jack d'un circuit vers A, met à l'aide d'une clé son cadran d'appel en circuit et compose le numéro de l'abonné a. Les impulsions émises par le cadran actionnent dans le bureau A un dispositif sélecteur qui peut être entièrement à relais ou comporter des organes mécaniques à un seul ou à deux mouvements ; ces organes prennent la position correspondant au numéro de l'abonné demandé. L'opératrice abaisse alors sa clé d'appel. L'abonné est sonné, il décroche et reçoit la communication.

La fin de la communication est signalée à l'opératrice comme précédemment. La transmission des impulsions de M vers A se fait soit par un fil, soit par les deux-fils en parallèle ; dans ce dernier cas, les circuits comportent des transformateurs d'appropriation.

Pour appeler un abonné b de B, l'opératrice émet un numéro dont le ou les premiers chiffres la relient au circuit A-B dans le central A et dont les autres chiffres sélectionnent l'abonné dans le central B.

Suivant les systèmes ou bien la sélection du circuit A-B provoque la liaison métallique des circuits M-A et A-B et les impulsions suivantes parviennent directement en B, ou bien le circuit A-B comporte au départ un « répéteur » qui retransmet en B les impulsions reçues de M.

Communications locales

Si l'abonné b demande une communication pour un autre abonné b' du bureau B, la téléphoniste effectue suivant les systèmes l'une des séries d'opérations suivantes :

1° l'opératrice ayant pris la demande, compose sur son cadran le numéro demandé et sonne ;

2° l'opératrice abaisse une clé, compose le numéro et sonne ;

3° l'opératrice rappelle le demandeur, abaisse une clé pour le faire passer sur un « circuit local », appelle ensuite le demandé et le fait passer sur le circuit local ;

4° l'opératrice se met en liaison avec le central B, fait une manœuvre de clé qui a pour effet de mettre en jeu un « cordon » de communications locales, compose successivement les numéros des deux abonnés et les sonne.

Dans tous les cas, lorsque la téléphoniste a établi la communication locale et vérifié que les abonnés sont entrés en conversation, elle retire sa fiche, ce qui libère les circuits M-A et A-B qui redeviennent disponibles.

Les organes d'établissement de la communication locale sont conçus et agencés différemment suivant les systèmes : dans certains, chaque circuit se termine par deux organes, un chercheur d'appels et un connecteur ; l'abonné demandeur est pris par le chercheur ; quand l'opératrice émet le numéro du demandé, les impulsions agissent sur le connecteur qui vient se brancher sur la ligne désirée ; l'opératrice en abaissant alors sa clé d'appel sonne le demandé qui décroche et se trouve en présence du demandeur. Quand l'opératrice retire sa

fiche, le circuit entrant se trouve relié à un autre ensemble chercheur-connecteur disponible et redevient libre.

Dans d'autres systèmes, chaque circuit est normalement terminé par un commutateur unique servant à la fois de chercheur d'appel ou de connecteur suivant que l'appel émane d'un abonné ou d'un bureau manuel. S'il s'agit d'une communication locale, l'opératrice, avant d'émettre le numéro du demandé, abaisse une clé de cadran. Cette manœuvre relie automatiquement le circuit dans le bureau rural à un cordon de communications locales formé par un chercheur et un connecteur ; le chercheur se branche automatiquement sur la ligne d'abonné en prise avec le commutateur du circuit. L'opératrice émet alors le numéro de l'abonné demandé, ce qui oriente le connecteur du circuit local sur la ligne de ce dernier. Au retrait de la fiche, le circuit et son commutateur sont libérés.

Dans d'autres, le cordon local se compose de 2 connecteurs. Le demandeur est rappelé par la téléphoniste à travers l'un d'eux, le demandé est appelé à travers l'autre.

Quand la conversation locale est terminée, le cordon local utilisé est libéré par le simple raccrochage des abonnés ou par ce raccrochage suivi de quelques tours de magnéto ; dans ce dernier cas, en vue de tenir compte de l'oubli possible de cette manœuvre, on a prévu des dispositifs de libération différée du cordon local ; celui-ci ne peut donc être indûment bloqué de manière durable.

Suivant l'importance du trafic local, il est possible d'avoir dans un central soit un, soit plusieurs cordons locaux.

Communications intérieures à un même secteur

Ces communications se traitent exactement comme les communications locales, le cordon local étant alors relié soit à un abonné et à un circuit, soit à 2 circuits.

Postes de secours

Dans chaque bureau, des dispositions spéciales ont été prévues pour que, en cas de dérangement de l'autocommutateur rural, un poste, si possible celui de la cabine publique, fonctionne à titre de secours et permette d'appeler le bureau manuel ou de recevoir ses appels.

Centres manuels à service non permanent

Il existe des centres tels que M (fig. 3) autour desquels sont groupés plusieurs bureaux ruraux, mais qui desservent dans l'ensemble moins de 200 abonnés. Ils ne peuvent donc avoir du personnel en permanence. Cependant ils ont un trafic interurbain assez élevé pendant la journée et sont reliés directement avec des centres importants. Dans de tels cas, on équipe en semi-automatique les bureaux du groupe-

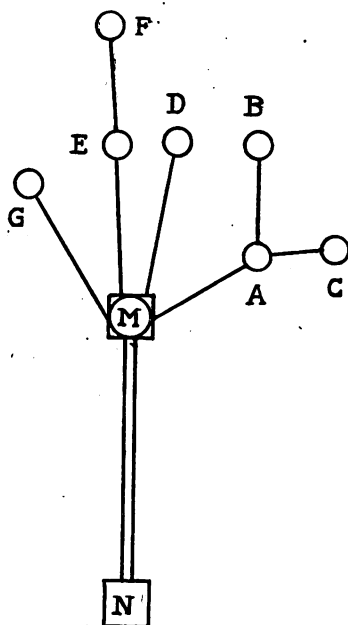


Figure 3.

ment et le centre M lui-même et l'on fait desservir tout l'ensemble pendant la journée par une téléphoniste placée en M. La nuit, il n'y a plus de personnel en M et tout le sous-groupement est renvoyé sur un bureau manuel N plus important et doté du service permanent.

*
**

Les résultats obtenus dans les groupements en cours d'essai permettent d'attendre de grands services de cette organisation de la téléphonie rurale.

La nouvelle formule à laquelle elle fait appel est d'une portée très générale et ne fait nullement double emploi avec celles qui ont été

essayées déjà depuis plusieurs années dans certains pays étrangers et qui comportent l'emploi de l'automatique complet. Ces dernières trouvent leur place dans les régions de forte densité téléphonique et de trafic relativement élevé ; en France même, dans certains cas, elles peuvent trouver leur application. Mais en ce qui concerne les régions véritablement rurales, à nombreux réseaux disséminés de très faible importance chacun et de faible trafic, on peut dire qu'il n'existait pas jusqu'à présent de systèmes automatiques qui leur fussent exactement adaptés ; cette lacune est sur le point d'être comblée grâce aux efforts des constructeurs et des inventeurs qui se sont attachés à résoudre le problème posé par l'Administration française des Postes, Télégraphes et Téléphones.

DOCUMENTATION SUR LE CHROMAGE

Bibliographie présumée de travaux parus

par M. ALTMAYER

1920

G. J. SARGENT

Electrolytic Chromium, dans « Transac. A. E. S. », vol. 37, pp. 479-497. Court historique, détails d'électrolyse avec des mélanges divers, données d'expériences, rendements, etc., résumés en huit tableaux récapitulatifs indiquant les conditions optima de travail; quelques considérations théoriques.

1922

E. LIEBREICH

Elektrolytische Verchromung, dans « Zeitung f. Metallkunde », vol. 14, N° 9 de sept. 1922, pp. 367-368 et d'après « J. Soc. Ind. », p. 229 A (1923), décrit dans la Revue de Métallurgie, « Extraits, », p. 424 (1923).

1923

K. W. SCHWARTZ

Chromium plating Steel using Chromium Anodes, dans « Trans. A. E. S. », vol. 44, pp. 451-466. Voir Revue de Métallurgie, Extraits de 1923, p. 358 et « Metal Industry », vol. 21. 1923, pp. 441-443.

F. C. KELLEY

Chromizing, dans « Trans A. E. S. », vol. 43, pp. 351-370. Historique suivi de la description détaillée du procédé du chromage par électrolyse au laboratoire de recherches de la G. E. Co ; 6 tableaux récapitulatifs de données et 8 figures macrographiques.

1924**K. W. SCHWARTZ**

Chromium Plating Steel, dans « Chem. and Metall. Engng ». vol. 30, pp. 627-629 du 21 avr. 1924, résumé par l'auteur du travail ci-dessus.

E. LIEBREICH

Chromage électrolytique, dans « Zeitschrift f. Metallurgie », vol. 16 (1924), analysé dans Rev. de Métallurgie, « Extraits », p. 456 (1925).

J. SIGRIST, P. WINKLER, M. WANTZ

Recherches sur l'obtention du Chrome Electrolytique, dans « Helvetica Chemica Acta », VII, p. 968. — Voir l'analyse faite dans les Extraits de la Revue de Métallurgie, p. 178 (1925).

1925**C. G. FINK**

Chrome surfaces electrolytically deposited dans « Blast Furnace Steel Plant », vol. 13, n° 6 de juin 1925, pp. 234-235; v. aussi vol. 11 N° 6 de juin 1925, pp. 202-203.

B. MENDELSON

Verchromung oder Vernickelung, dans « Motorwagen », vol. 28, N° 33 du 30 nov. 1925, pp. 728-729.

R. J. PIERSON

Chromium found to be satisfactory as coating for reflectors, dans « Automotive Industries », vol. 53, N° 12 du 17 sept. 1925, pp. 449-450. suiv. confér. à l'Illuminating Engrs Soc. N. Y.

G. M. ENOS

Notes on the plating of Chromium Steel, dans « Trans. A. E. S. », vol. 48, pp. 37-46. — Description du chromage thermique, tableaux récapitulatifs d'expériences ; Bibliographie, 27 travaux cités, liste de livres et brevets depuis 1890.

A. H. PACKER

Chromium Plating is brought down to Commercial basis, dans « Automotive Industries » (N. Y.), vol. 53, N° 20 du 12 nov. 1925, pp. 831-832.

H. E. HARING

Principles and Operatig Conditions of Chromium Plating, dans « Chem. and Metall. Engng » (N. Y.). Vol. 32, N° 14 d'août 1925, pp. 692-694 avec correction p. 756 ; commenté dans « Rev. de Métallurgie » (1926), les Extraits, p. 387. Etude préluant à son grand rapport de juin 1927.

A. E. OLLARD

The Corrosion Resistance of Chromium Plated Steel, dans « Metal Industry » (Lond.). Vol. 27, N° 11 du 11 sept. 1925, pp. 235-237. Données sorties du labor. de la Métrop. Vickers Electr. Co ; essais comparatifs faits avec d'autres métaux. Disc. à la Brit. Assocn.

JOS. HAAS JUN^r

Electroplating Costs, dans « Metal Industry » (N. Y.), vol. N° 1 et 2 de janv. et fév. 1925, pp. 18-20 et 67-68 ; aussi « Metal Industry » (Lond.), vol. 26, N° 16 du 17 av. 1925, pp. 386-390. Méthodes d'organisation du prix de revient ; main-d'œuvre, frais généraux, prix de revient du polissage, etc.

E. LIEBREICH

Chromium Plating and its applications, dans « Metal Industry » (Lond.), vol. 26, N° 18 du 1^{er} mai 1925, p. 432 (trad. de « Zeit. f. Metallkunde »).

E. A. BEEK

Chromium Plating, dans « Chem. and Metall. Engn ». J1 de sept. 1925, vol. 32, N° 15, p. 756. Commentaire sur l'art. de H.-E. Haring précité.

1926

W. BLUM

Chromium Plating, dans « Brass World » (N.-Y.), de déc. 1926 et « Mechan. Engineer » (N.-Y.), de janv. 1927.

E. LIEBREICH

Theory of Chromium Deposition, dans « Korrosion und Metallschutz » de sept. 1926.

E. MILLER

Theory of Electrolytic Separation of Chromium from an aqueous solution of Chromic acid, dans Zeitung f. Elektrochemie » d'août 1926.

G. R. VON KELER

Chromium Plating Patent Muddle, dans « Brass World » (N.-Y.) de juin 1926.

G. GRUBE, L. SCHLECHT

Ueber das Elektrochemisches Verhalten des Chroms, dans « Zeitung f. Elektrochemie », vol. 32, N° 4 d'avril 1926, pp. 178-186. Recherches sur l'équilibre des solutions d'ions de chrome divalents ou divalents et trivalents ; examen de l'équilibre en solution neutre de sulfate de chrome avec électrode active de chrome.

E. LIEBREICH, W. WIDERHOLT

Ueber das Elektrochemisches Verhalten des Chroms, dans « Zeitung f. Elektrochemie », vol. 32, N° 5 de Mai 1926, pp. 261-163. Les auteurs critiquent les conclusions de Grube, Heidinger et Schlecht sur la passivité du chrome ; G. Grube y répond et divers autres auteurs interviennent au débat ; voir plus loin.

G. GRUBE, R. HEIDINGER, L. SCHLECHT

Ueber das Elektrochemisches Verhalten des Chroms, dans « Zeitung f. Elektrochemie », vol. 32, N° 2 de fév. 1925, pp. 70-79 sur la façon de se comporter de l'anode au cours du dépôt électrolytique du chrome, avec 4 figures.

E. A. OLLARD

A General Survey of Chromium Plating, dans « Metal Industry » (Lond.), vol. 28, N° 7 du 12 fév. 1926, pp. 153-155. Résumé d'un rapport exposant la situation de la question à

cette époque, les perfectionnements pratiques apportés, lu à l'Electroplaters and Depositors Tech. Soc. avec discussion dans le même journal, vol. 28, N° 8, fév. 1926, pp. 173-177.

E. T. OLLARD

Chromium Plated Automobile Lamps and fittings predicted, dans « Automotive Industries », vol. 54, N° 16 du 22 avril 1926, pp. 695-698 ; quoique plus coûteux qu'un dépôt de nickel, le dépôt de chrome protégerait mieux contre la corrosion ; sa dureté et sa résistance à l'usure favoriseront son emploi.

ANON

Chromium Plating, dans « Iron Age », vol. 117, N° 17 du 29 avril 1926, pp. 1187-1189, 4 figures. Son application fondée sur une forte production pour diverses parties de l'automobile à l'Olds Motor Wks, procédé développé par la General Motors Corp'n ; coût de production inférieur au prix du du nickelage ; v. « Automotive Industries », vol. 54, N° 17 du 29 août 1926, pp. 722-724, avec 4 figures.

P. W. C. STRAUSSER

Chromium Plating Progress, dans « Metal Industry » (N.-Y.), vol. 24, N° 9 de sept. 1926, pp. 372-374 ; conférence à l'Am. Electroplaters Assocn.

C. G. FINK

Doct. Fink's Chromium Plating Patent, dans « Brass World », vol. 22, N° 9, de sept. 1926, pp. 289-290.

C. H. HUMPHRIES

Plating with Chromium for wear, dans « Iron Age », vol. 118, N° 10 du 2 sept. 1926, pp. 599-600. Description de nombreux usages exigeant des qualités de durée et une résistance notable à l'oxydation.

H. C. HERZOG

Recent Progress of Chromium Plating in Germany, dans « Metal Industry » (Lond.), vol. 29, N° 19 du 5 nov. 1926,

p. 440. Nombreuses applications des dépôts de chrome, procédés et qualités.

C. H. PROCTOR

Chromium Plated Gold, dans « Metal Industry » (N.-Y.) ; vol. 25, N° 10 d'octobre 1926, pp. 419-420. Explication des dangers à éviter.

1927

E. ALEXANDER

Theory of the Deposition of Chromium, dans « Metal Industry » (Lond.) du 11 nov. 1927.

W. BLUM

Chromium Plating is expanding, dans « Iron Age » du 16 déc. 1927.

D. T. EWING, A. M. MALLOY

The Electrolytic Deposition of Chromium, « Michigan Exp. St. Bulletin » du 7 sept. 1926.

B. S. FIELD

Chromium Plating again reviewed, dans « Brass World » (N.-Y.) de sept. 1927.

H. E. HARING, W. P. BARROWS

Electrodeposition of Chromium from Chromic acid Baths, dans Rapport Technique, N° 346 de l'U. S. Bureau of Standards du 10 juin 1927 ; commenté dans les Extraits de la Revue de Métallurgie (1929), p. 519, par J. Galibourg.

W. PFANHAUSER

Fortschritte in der Verchromung, dans « Chemiker Zeitung » du 10 août 1927.

W. PFANHAUSER

Bosse Process of Chromium Plating, dans « Metal Industry » (Lond.) du 7 oct. 1927, vol. 31, N° 14, pp. 315-316 ; description d'un procédé par le vide.

W. N. PHILLIPS

Chromium Plating, dans « Machinery » (Lond.) du 17 mars 1927.

W. N. PHILLIPS

Chromium Plating and Automobiles, dans « Brass World » d'avril 1927.

F. R. PORTER

Observations on Chromium Plating, dans « Brass World » du 8 août 1927, vol. 23, N° 8.

S. STETSCHERBAKOW, O. ESSIN

Ueber die Elektrolytische abscheidung von Metallischen Chrom aus Chromsaurelösungen, dans « Zeitschrift f. Elektrochemie » de juin 1927.

C. VAN DERAN

Chromium Plating Electrical Applicances, dans « Brass World » d'octobre 1927.

O. P. WATTS

Anodes for Chromium Plating, dans « Trans. A. E. S. », vol. 52, pp. 177-187 ; examen des diverses matières employées pour électrolyser le chrome en solution d'acide chromique ; la plus avantageuse est le plomb.

L. WEIBERG, W. F. GREENWALD

New Chromium Plating Plant, dans « Metal Industry » (N.-Y.), vol. 25 du 11 nov. 1927. 5 figures. Description de l'usine de la National Chromium Corporation.

S. WERNICK

Recent developments in Chromium Plating, dans « Metal Industry » (Lond.), N°s 13 14, 15 des 30 sept., 7 oct. et 14 oct. 1927, pp. 291-293, 313-315, 345-346. Examen des travaux de recherches au cours de ces dernières années.

F. SILLERS Jun.

Note on the Crystal Structure of Electrodeposited Chromium, dans « Trans A. E. S. », vol. 52, pp. 301-308. Etude des dépôts de chrome électrolytique par la méthode des rayons X, dépôts brillants, gris ou brûlés. Mêmes cristaux observés que par fusion.

G. GRUBE, C. BREITINGER

Ueber das Elektrochemische Verhalten des Chroms, dans « Zeitung fur Elektrochemie », vol. 33, N° 3 de mars 1927, pp. 112-114. Au sujet de la détermination du potentiel d'équilibre Cr/Cr des solutions de sulfate de chrome.

E. LIEBREICH

Zur Theorie der Elektrolytischer Abscheidung des Chroms aus Wässerig chromsäurelösungen, dans « Zeitung f. Elektrochemie », vol. 33, N° 2 de fév. 1927, pp. 69-72. Commente une étude de E. Müller concernant le brevet Salzer de 1907 ; signale que ses études et celles de Sargent datent de la même époque ; cet article est suivi, p. 72-76, d'un article de E. Müller rejetant les prétentions de Leibreich ; voir « Sci. Abstracts », vol. 30, N° 6 juin 25-1927.

R. SCHNEIDEWIND

A Study of Chromium Plating, dans « Research Bull. of Univ. of Michigan », N° 10 de sept. 1928 et aussi **A Study of Patents Dealing with the Electrodeposition of Chromium** dans « Univ. Michigan depart. Eng. Research », Bulletin N° 8 nov. 1927, 49 pages. Passe en revue les brevets et discute leurs mérites respectifs ; d'après lui aucun brevet ou groupe de brevets ne protège le dépôt du chrome métallique en partant de bains d'acide chromique. Voir un résumé dans « Metal Industry » (N.-Y.), vol. 25, N° 12 de déc. 1927, pp. 501-504.

H. E. HARING, W. P. BARROW

Detailed Study of Chromium Plating, dans « Brass World », vol. 23, N° 9 de sept. 1927, pp. 299-305 (Résumé du Rapp.

N° 346 de ces auteurs dans la série de l'U. S. Bureau of Standards du 10 juin 1927). Une des principales études détaillées du sujet.

C. H. PROCTOR

Advance in Chromium Plating, dans « Brass World », vol. 23, N° 6 de juin 1927, pp. 193-194 ; description des avantages qui en ressortent pour divers corps de métier.

W. TORAU

Verchromung von Beschlagteilen der Strassenbahnwagen. dans « Verkehrstechnik », vol. 40, N° 24 du 17 juin 1927, pp. 409-410. Enumère les pièces d'équipement gagnant à être chromées, dans les tramways et automobiles, ainsi que les cadres de bicyclettes, les instruments de chirurgie, etc.

D. H. KILLEFFER

Chromium Plating a new aid to Industry, dans « Indust. and Engng Chemistry », vol. 19, N° 7 de juillet 1927, pp. 773-776 sur l'utilité des revêtements de Chrome, description des méthodes pour les obtenir. Voir aussi « Iron and Steel of Canada », vol. 10, N° 7 de juillet 1927, pp. 207-209.

W. PFANHAUSER

Fortschritte in der Verchromung, dans « Korrosion und Metallschutz », vol. 3, N° 11 de nov. 1927, pp. 247-248. Décrit le procédé de dépôt du chrome par le vide et l'hydrogène, inventé par Von Bosse et commercialisé par les Langbein-Pfanhauser Werke A. G., de Leipzig et Vienne.

W. N. PHILLIPS

Purposes, Methods and Results of Chromium Plating, dans « Soc. Automotive Engrs », Jl, vol. 20, N° 2 et 4, fév. et avril 1927, pp. 255-258 et discussion, pp. 478-483, 7 figures ; voir « Iron Age », vol. 119, N° 11 du 17 mars 1927, pp. 773-774. Emplois les plus récents ; prix de revient non excessif, durée plus grande pour les tailles recouvertes.

E. A. OLLARD

New Theory of Chromium Plating, dans « Chemical Age » (Lond.), du 3 déc. 1927.

E. A. OLLARD

The Theorie of the Deposition of Chromium, dans « Metal Industry » (Lond.), vol. 31, N° 19 du 11 nov. 1927, pp. 437-439, 3 figures ; discussion dans le N° 21 du 25 nov. 1927, pp. 485-486 ; chimie du chrome en ce qui concerne son dépôt par électrolyse ; ionisation des composés du chrome ; composition des solutions de dépôt du chrome.

1928

J. BEEKER

Warning against quickly applied Chromium Plating, dans « Iron Age » du 5 avril 1928.

W. BLUM

Mechanical applications of Chromium Plating, dans « American Machinist » du 13 déc. 1928.

W. BLUM

Chromium Plating for wear resistance, dans « Machinery » (N.-Y.) de janvier 1929.

W. BLUM

Chromium Plating in wider use for resistance to wear, dans « Iron Trade Review » du 6 déc. 1928 et aussi dans « Abrasive Industry » de janv. 1929.

P. CATUCCI

Chromium Plating Metal Working Tools, dans « Machinery » (Lond) de juin 1928.

F. W. CURTIS

Chromium Plating Applied Automatically, dans « American Machinist » du 10 mai 1928.

P. E. EDELMAN

Chromium Plating Fundamentals, dans « Brass World » de déc. 1928.

L. E. GRANT, L. F. GRANT

Notes on the Hardness and Structure of Deposited Chromium, dans « Trans. A. E. S. », vol. 53, pp. 509-525 de 1928 ; commenté dans les Extraits de la Revue de Métallurgie (1928), p. 356. Traitent de l'effet de la densité de courant et de la température sur la dureté des dépôts. Les dépôts durs sont obtenus avec des densités relativement élevées. Conditions de résistance à la corrosion dans le cas de craquelures apparaissant dans le dépôt. 12 figures, 2 tableaux de résultats et longue discussion des spécialistes.

H. S. LUKENS

Influence of the cathode on the electrodeposition of Chromium, dans « Trans. A. E. S. », vol. 53, pp. 491-498 de 1928. Discute l'influence du nickel passif et actif, du cuivre, du plomb sur la composition des solutions pour le dépôt électrolytique du chrome. Moyens de correction en agissant sur le sel de chrome et l'acide sulfurique contenus dans la solution.

R. SCHNEIDEWIND, S. F. URBAN

Behavior of Plating Baths and Anodes during Electrodeposition of Chromium, dans « Trans. A. E. S. », vol. 53, pp. 456-490 de 1928, commenté dans les Extraits de la Revue de Métallurgie (1928), p. 350.

R. SCHNEIDEWIND, S. F. URBAN, R. C. ADAMS, JUN^r

The effect of Trivalent Chromium and Iron on Chromic acid Chromium Plating Baths, dans « Trans. A. E. S. », vol. 53, pp. 499-508 de 1928, commenté dans les Extraits de la Revue de Métallurgie de 1928, p. 356. Etudie la loi du dépôt du chrome électrolytique selon la composition et la

température du bain. Dépôts sur le cuivre. Conditions pour l'obtention de dépôts épais satisfaisants. Etroitesse des limites entre lesquelles il convient d'opérer.

E. M. BAKER, E. E. PETTIBONE

Steel Anodes for Chromium Plating, dans « Trans. A. E. S. », vol. 54, pp. 331-336 de 1928. Etudie les effets de la variation de la teneur en carbone de l'acier sur la rapidité de corrosion de l'anode et l'oxydation du chrome trivalent ou hexavalent. L'acier à moindre teneur en carbone est plus résistant et le fer électrolytique plus résistant que l'acier.

E. M. BAKER, A. M. RENTE

Porosity of Electrodeposited Chromium, dans « Trans. A. E. S. », vol. 54, pp. 337-346 de 1928. Fait ressortir que l'épaisseur du dépôt nécessaire pour procurer la porosité minimum croît avec la température du bain. Discussion détaillée des causes de cette porosité.

C. H. ELDRIDGE

Polish essential for Chromium Plating, dans « Iron Age » du 14 juin 1928.

E. LIEBREICH

Der Heutige Stand der Verchromung, dans « Korrosion und Metallschutz » de février 1928.

E. C. LOVERING

Platers should Study Chromium, dans « Brass World » d'avril 1928.

M. F. MACAULAY, W. H. PHILIPPS

Chromium Plating Progress, dans « American Machinist » du 24 janv. 1929.

J. ROUNICK

Les dépôts électrolytiques des Métaux, dans la « Revue universelle des Mines » du 1^{er} déc. 1928.

A. SIEMENS

Gegenwärtigen Stand der Verchromungstechnik, dans « *Zeitschrift f. Elektrochemie* » de mai 1928.

ANON

Patent Bibliography on Chromium Plating, dans « *Brass World* » de mars 1928.

J. COURNOT

Le Chromage électrolytique, dans le Bulletin (mars-avril 1928) de la Soc. des Ingénieurs Civils, Mémoires CXVII, pp. 301-311. Revue des progrès de cette technique.

1929

W. L. PINNER, E. M. BAKER

The Bent cathode Test for determining the optimum ratio of chromic acid to sulfate in chromium Plating Baths, dans « *Trans. A. E. S.* », vol. 55, pp. 315-331 de 1929, étude résumée dans les Extraits de la « *Revue de Métallurgie* » (1930), p. 192, par J. Cournot. Moyen de contrôle du rapport de l'ac. chromique au sulfate, opération fondamentale pour suivre les bains de chromage. Description d'une méthode rapide n'exigeant pas une analyse quantitative.

R. E. BREWER, G. H. MONTILLON

Measurements of Hydrogen ion concentration in Plating Baths, dans « *Trans. A. E. S.* », pp. 357-382 de 1929 ; fournit outre une description des méthodes générales quelques données sur les bains pour chromage électro, voir pp. 359-366-370 entre autres.

R. J. PIERSON

Effect of Current Density upon the Hardness of electrodeposited Chromium, dans « *Trans. A. E. S.* », vol. 56, pp. 371-377 de 1929. Etudie diverses densités de courant de 16 à 109 A/dm² et trouve que 62 A/dm² donne le résultat optimum. Fait un historique, décrit ses expériences, ses résultats et les discute.

H. H. WILLARD, R. SCHNEIDEWIND

Determination of Sulfate in Chromic acid and in Chromium Plating Baths, dans « Trans. A. E. S. », vol. 56, pp. 333-362 de 1929. Rentre dans le détail de la technique des expériences et déterminations expérimentales. 3 tableaux détaillés et 4 figures (courbes), plus 1 croquis fournissent de nombreuses indications utiles au laboratoire de recherches. Une discussion d'experts suit.

C. M. ALTER, F. C. MATHERS

Some Chromium Plating Experiments, dans « Trans. A. E. S. », vol. 56, pp. 363-370 de 1929. Commenté dans les Extraits de la Revue de Métallurgie (1929), p. 501, par J. Cournot.

J. D. EDWARDS, S. C. TAYLOR

Solution Potential of Aluminium Alloys, dans « Trans. A. E. S. », vol. 56, p. 37 de 1929, remarque dans la discussion entre experts sur la question du chrome déposé sur l'aluminium.

1930

R. H. CHERRY

Some Conductivity Characteristics of Chromic acid and chromic acid Chromium Plating Solutions, dans « Trans. A. E. S. », 1^{er} juin 1930. Epreuve 57-5 avec 5 figures et 5 tableaux étudiant les conditions optima d'amélioration de la conductibilité des solutions de chromage.

(1) Dans le travail qui précède, l'abréviation fréquente ainsi conçue « Trans. A. E. S. » signifie les mémoires publiés dans la collection des Transactions de l'American Electrochemical Society.

(2) Pour l'accès des sources citées, consulter les cinq fascicules publiés par Masson et Cie de l'Inventaire des Périodiques Scientifiques des Bibliothèques de Paris sous la Direction de A. Lacroix, Secrétaire Perpétuel de l'Académie des Sciences, avec Tables.

TRAVAUX DES SECTIONS

COURTS CIRCUITS DANS LES RÉSEAUX ET PROBLÈMES CONNEXES

par M. LANGLOIS-BERTHELOT

Ingénieur aux Forges et Ateliers de Constructions Electriques de Jeumont

I. Introduction.

II. Stabilité statique et stabilité transitoire d'un réseau.

1^o Notion de stabilité statique. Stabilité naturelle et artificielle. Faits d'expérience.

2^o Notion de stabilité transitoire. Perturbation. Méthodes de calcul. Faits d'expérience: cas typiques d'instabilité.

Solutions à l'essai ou à l'étude en Amérique pour augmenter la stabilité en cas de perturbation transitoire:

1. Disposition du réseau.

2. Excitation rapide. Cas où elle est utile.

3. Disjoncteurs rapides.

Conclusion générale sur le problème de la stabilité. Position actuelle de l'exploitant et du constructeur en face de ce problème.

III. Prédétermination des courants de court-circuit et choix des disjoncteurs. Calcul du courant de court-circuit dans une branche d'un réseau.

Difficultés: réactances transitoires. Notions nouvelles à ce sujet. Décrément.

Solution pratique du problème.

La connaissance du courant maximum à couper ne suffit pas pour calibrer le disjoncteur.

Raisons pour lesquelles les Américains ne garantissent pas la capacité de rupture.

IV. Conclusion.

I. — INTRODUCTION

Au cours de nos réunions d'octobre, M. Fallon a présenté une communication sur la protection contre les courts-circuits dans les centrales et les réseaux. J'ai été amené à présenter quelques remarques à cette occasion, en rattachant le sujet traité au problème général de l'interconnexion.

Je me propose d'y revenir aujourd'hui et de vous parler des problèmes de machines et d'appareillage que pose la question de la protection contre les courts-circuits dans les réseaux, problèmes que j'ai eu l'occasion d'étudier au cours d'un récent voyage aux Etats-Unis.

Les moyens des Américains sont plus puissants que les nôtres, comme chacun le sait. Mais il ne faut pas leur refuser le mérite d'avoir su mettre en œuvre les procédés les plus coûteux et les plus perfectionnés qui soient connus à l'heure actuelle, pour analyser les phénomènes; et de plus ils ont le mérite d'oser essayer. Je n'en citerai qu'un exemple: à plusieurs reprises, certaines de leurs sociétés de distribution

ont admis que les constructeurs viennent provoquer intentionnellement des courts-circuits pour analyser les effets des perturbations. Une semblable pratique n'est pas encore entrée dans les mœurs de nos sociétés, pour autant que l'opinion que je me fais des choses soit correcte.

II. — STABILITÉ STATIQUE ET STABILITÉ TRANSITOIRE D'UN RÉSEAU

On a beaucoup parlé en Amérique, depuis 5 ans, de ces questions qui ont fait l'objet de nombreuses recherches. La lecture de toutes ces publications laisse dans l'esprit la notion assez confuse de l'existence d'un important problème, dont les conditions sont fort complexes.

Ce problème est-il réellement important, dans la pratique actuelle ? Conduit-il à changer quelque chose dans la façon d'établir les projets nouveaux et le matériel correspondant ?

La question intéresse à la fois le constructeur et l'exploitant. L'exploitant doit savoir ce qui se passe, et le constructeur doit suggérer des solutions et indiquer ses possibilités.

Comme vous le verrez par la suite, je reste bien dans le cadre du problème des courts-circuits, qui sont à l'origine de tous les phénomènes d'instabilité transitoire.

1° *Notion de la stabilité statique*

Je vais reprendre la suite des idées, par une analyse assez grossière qui a l'avantage de laisser dans l'esprit des notions simples. Ce sont des problèmes trop compliqués pour que l'on puisse les aborder du premier coup dans toute leur complexité de détail.

1. — Considérons d'abord une ligne de transport d'énergie, reliant deux points en chacun desquels la tension est maintenue constante.

On peut alors construire la relation vectorielle entre tensions aux extrémités de la ligne, et chute en ligne, avec tensions constantes (pas nécessairement égales) à l'origine et l'extrémité de la ligne. On arrive à cette conclusion connue que la puissance qu'une ligne de constantes données est capable de transmettre, est limitée.

Si l'on tient compte des transformateurs élévateur et abaisseur, la puissance limite est abaissée. Ce sont-là des résultats classiques.

2. — Considérons un générateur réel et un récepteur synchrone réel, réunis par une ligne idéale (Idéal voulant dire : sans résistance ni réactance). Nous admettons une excitation constante sur chaque machine.

Le diagramme simplifié de la machine synchrone ne tient compte que de la tension d'origine et d'extrémité, de la chute ohmique et de la chute inductive (Diagramme assez grossier, car la réactance ainsi définie n'a pas de sens bien précis.)

Le diagramme combiné du générateur et du récepteur montre qu'il y a une limite à la puissance que le système peut transmettre. Quand la charge augmente, la tension induite dans le récepteur se décale en arrière par rapport à celle induite dans le générateur, et pour un angle limite déterminé, le système décroche. Le récepteur ralentit et s'arrête. Autrement dit, il ne reste accroché que s'il reçoit du générateur assez de puissance synchronisante.

La limite de puissance s'appelle *limite de stabilité statique naturelle*.

3. — Même cas que le précédent, le récepteur étant asynchrone (moteur d'induction).

En construisant le diagramme de la tension du générateur en fonction du courant pour une excitation donnée, on reconnaît que cette courbe présente un maximum. D'autre part, un moteur d'induction prend un courant qui augmente quand la tension diminue, si le moteur entraîne une charge qui ne dépend que de la vitesse. Dans ces conditions, au delà d'une certaine charge la tension ne peut se maintenir aux bornes du moteur, qui s'arrête. Ce n'est pas un décrochage comme dans le cas précédent : c'est la tension qui tombe. Le mécanisme est différent.

4. — Considérons un générateur et un récepteur synchrone réunis par une ligne réelle. Un diagramme combinant toutes les résistances et réactances montre qu'il y a une limite, inférieure à celle du deuxième cas, pour laquelle le système décroche.

Jusqu'ici un calcul précis est possible, suivant des méthodes connues.

5. — Considérons le cas 4, mais avec régulateur automatique d'excitation maintenant la tension aux bornes constante aux deux extrémités de la ligne.

Examinons ce qui se passe. Partons d'un état initial de régime. Le courant augmente dans le circuit, la tension tombe, l'angle augmente (tout cela suivant le diagramme du paragraphe 4, car le régulateur

n'a pas encore agi). Puis le régulateur agit et on passe à un autre diagramme. Si l'on était initialement près de la limite de stabilité statique naturelle, alors on peut se demander si le système dépassera la limite dans le court intervalle de temps pendant lequel le régulateur n'a pas agi, ou si le régulateur viendra en temps voulu. On conçoit donc qu'il y ait une limite différente de stabilité avec régulateur : la limite de *stabilité statique artificielle* qui fait intervenir le temps.

6. — Considérons un système réel composé d'un certain nombre d'unités génératrices interconnectées alimentant une charge. C'est là finalement le cas intéressant, les cas précédents n'ayant été considérés que pour montrer la suite des idées. Alors les choses sont beaucoup plus compliquées.

a) Parce que la présence de générateurs en différents points du système oblige à de nouvelles hypothèses. Un générateur placé au voisinage de la station réceptrice doit être combiné avec le récepteur en une sorte de récepteur synchrone fictif équivalent seulement pour ce qui concerne la puissance que le générateur transmet à travers la ligne au centre récepteur.

b) parce que la charge est partie synchrone, partie asynchrone.

Ainsi le calcul de la limite de stabilité statique naturelle ou artificielle dans un réseau réel apparaît comme un problème singulièrement délicat.

L'existence d'une limite de stabilité statique ne laisse cependant place à aucun doute ; elle a été constatée expérimentalement dans le cas de la ligne de Los Angeles à Big Creek en Californie en 1925. Deux lignes de quelques centaines de kilomètres transmettaient normalement la puissance des centrales de Big Creek vers Los Angeles. Un jour une des lignes se trouvait hors service, et l'autre transportait toute la charge.

La demande de puissance à Los Angeles augmentant à l'heure de la pointe, un moment est arrivé où la limite de puissance correspondant à la stabilité statique a été atteinte, et il s'en est suivi un décrochage, la charge atteignant 186 000 kW sur la ligne 220 000 V. Le lendemain, à la même charge, le même phénomène s'est reproduit.

C'est cette constatation qui a attiré l'attention générale des ingénieurs américains sur le problème de la prédétermination de la limite de stabilité statique.

Un calcul a été établi justifiant que, dans le cas particulier cité ci-dessus, et en raisonnant comme je l'ai indiqué plus haut, le décrochage devait bien se produire pour 186 000 kW.

Comme le savent les ingénieurs praticiens, les meilleurs calculs se font après coup. Celui qu'il m'a été donné de parcourir m'a paru assez fragile.

2° *Notion de stabilité transitoire*

Nous avons considéré jusqu'ici que la charge était augmentée de façon progressive. Supposons maintenant une brusque variation de charge, à la suite d'une perturbation.

Ce cas est fondamental dans la pratique, car tout réseau est sujet à des perturbations parmi lesquelles il faut distinguer :

a) les perturbations que l'on peut qualifier de normales, telles que celles amenées par l'ouverture brusque d'une liaison (dans le cas d'un réseau interconnecté) à la demande du dispatcher.

b) les perturbations amenées par un défaut : court-circuit rapproché (à la terre, ou entre phases) ;

c) les perturbations atmosphériques.

Ce sont les perturbations de la seconde catégorie qui nous intéressent ici.

Qu'arrive-t-il en pareil cas ? L'angle de phase entre les tensions de 2 différents points du système varie, et peut dépasser l'angle limite de stabilité statique. Dans ce cas le système décroche.

Le décrochage peut être de nature transitoire (l'opérateur peut souvent par une manœuvre convenable remettre le tout en phase, ce qui limite la durée troublée) — ou de nature définitive (nécessitant une nouvelle synchronisation).

L'inertie des machines fait que la variation de phase présente un caractère oscillatoire. Le calcul de l'amplitude et de la durée des oscillations met en jeu cette inertie, la nature du défaut, sa durée, l'amortissement, et aussi les conditions de fonctionnement des régulateurs d'admission des turbines.

Si les machines du réseau sont les unes à vapeur, les autres hydrauliques, la machine de moindre inertie sera influencée la première et pourra décrocher — amenant un décrochage général si son disjoncteur ne l'élimine pas.

Les Américains calculent ces régimes troublés en considérant successivement chaque centième de seconde, et en admettant que les

conditions qui caractérisent l'état permanent sont valables pendant chacun de ces intervalles : il existe à chaque instant une limite de stabilité statique naturelle, et le rapprochement des instants successifs permet d'analyser les phénomènes.

Un tel calcul est fort long, et demande la résolution d'un système d'équations simultanées assez nombreuses.

Pour tout projet important, les ingénieurs américains s'astreignent à faire ce calcul, et on ne peut qu'admirer cette conscience professionnelle.

Les phénomènes d'instabilité en régime transitoire sont d'observation assez fréquente dans les réseaux.

Si on prend la statistique des interruptions de service qui se produisent dans un réseau — baisse de tension plus ou moins durable — il y a des cas où l'on se dira : les phénomènes auraient-ils été les mêmes si les machines avaient été dimensionnées autrement ? Si le réseau avait été établi autrement ? et il est difficile de répondre à ces points d'interrogation.

Pour préciser la question, voici quelques cas typiques d'instabilité qui m'ont été cités :

1^{er} cas. — Court-circuit sur un départ, près des barres d'un générateur, dans un système étroitement interconnecté — ce cas étant l'un des cas de trouble les plus graves.

Dans un réseau (Réseau de Chicago) il a été indiqué que le court-circuit ayant été coupé après $1/3$ de seconde, la tension aux barres n'était tombée qu'à la moitié de sa valeur, et le générateur est resté accroché après que le disjoncteur eut déconnecté la faute.

Ceci montre qu'un système étroitement interconnecté a une stabilité intrinsèque élevée.

2^e Cas. — Système interconnecté de turbines hydrauliques séparé par quelques dizaines de kilomètres et faute dans une ligne aérienne.

On a observé (Réseau de San Francisco) que les générateurs se comportaient différemment selon leur rapport de court-circuit. Il y avait 3 machines de rapports 1,50, 1,25, 1,10.

La machine 1,50 restait pratiquement toujours accrochée avec le reste du système. La machine 1,25 décrochait en cas de trouble grave et la machine 1,10 décrochait même en cas de légère perturbation.

Cela tient à ce que une machine à faible tension de c. c. est une machine à mauvaise régulation propre ; tout ce qui agit pour augmenter la chute de tension est dans le sens de l'instabilité

A la suite de cela les sociétés d'exploitation ont été conduites à spécifier la limite inférieure du rapport de c. c. dans leurs cahiers des charges.

Cette question du rapport de c. c. optimum a fait l'objet de nombreuses discussions ces dernières années. Le constructeur désire un rapport faible pour avoir une machine à petit flux (cela devient de plus en plus nécessaire à mesure que les machines deviennent plus puissantes, la machine à petit flux, étant plus petite, a une plus grande marge de sécurité mécanique). Quant à la stabilité, l'argument du constructeur est que, s'il réduit la stabilité naturelle, il sait par contre augmenter la stabilité par des moyens peu coûteux. Ces considérations ont été développées très complètement par M. Darrieus dans une communication présentée en 1929 à la Conférence Internationale des grands réseaux électriques.

Néanmoins les exploitants américains imposent à l'heure actuelle des rapports limite — dont la valeur est une question de pur sentiment, et qu'ils seraient bien en peine de justifier. L'idée est : puisqu'il y a un risque, il vaut mieux que les autres essayent d'abord.

La pratique en Europe est de descendre beaucoup plus bas pour le rapport de c. c. et il ne semble pas que des inconvénients se soient manifestés pour cette cause.

Cependant, cela est bien difficile à préciser. Quand un c. c. se produit dans un réseau, si une machine du réseau décroche, on peut dire que si elle avait eu un rapport de c. c. plus élevé, elle n'aurait peut-être pas décroché. On a dit cela de certains décrochages dans des centrales de Berlin. Et l'exemple de la pratique européenne n'apparaît pas probant aux Américains, dont les réseaux plus étendus sont davantage sujets à l'instabilité.

On a observé également (réseau de San Francisco), que plus il y a d'excitation sur un générateur, plus il est stable, ce qui est conforme à la théorie. On en a conclu que, pour la transmission à longue distance, il fallait une tension décroissante de l'origine à l'extrémité de la ligne (marche à différence de tension constante) pour avoir les alternateurs hydrauliques travaillant légèrement en KVA arrière. Quant aux alternateurs à vapeur, à rapport de c. c. moindre, il convient de les utiliser avec un facteur de puissance arrière sensiblement inférieur à l'unité qui correspond à une grande surexcitation.

3^e Cas. — Une station hydraulique alimente par deux longues lignes une sous-station qui fait partie d'un système interconnecté. Un défaut fait déclencher une ligne.

J'ai déjà analysé ce cas au cours de la précédente discussion.

Reprenons cependant les choses avant que le relais n'ait déclenché la ligne avariée.

Supposons que le défaut reste assez longtemps pour que les régulateurs aient le temps d'agir.

L'usine hydraulique alimente le défaut : ses kW varient (baissent en général), l'usine à vapeur (du côté de la charge) alimente le défaut et sa charge varie aussi. On coupe alors le défaut. La charge se rétablit des deux côtés, les régulateurs agissent mais avec des vitesses différentes et les deux systèmes peuvent décrocher. (Deux fréquences apparaissent dans le système ; il faut pour rétablir les conditions agir sur les régulateurs pour baisser une fréquence et relever l'autre). La difficulté vient de la lenteur des régulateurs : il y a un retard entre l'instant où un changement est nécessaire et celui où ce changement se produit (on étudie actuellement des régulateurs de turbines sensibles non seulement à la vitesse mais au taux de sa variation, c'est-à-dire à l'accélération.)

On voit en conclusion que les phénomènes d'instabilité transitoire sont en général à envisager sur les grands réseaux : le dernier cas cité (2 lignes, dont une déclenche) est le cas typique d'une perturbation qu'il faut prévoir car elle est inévitable en service.

SOLUTIONS A L'ESSAI OU A L'ÉTUDE EN AMÉRIQUE POUR AUGMENTER LA STABILITÉ EN CAS DE PERTURBATION TRANSITOIRE

1. Disposition convenable du réseau ;
2. Excitation rapide ;
3. Disjoncteurs rapides.

1. Disposition du réseau

Dans un réseau étroitement interconnecté, tous les moyens qui réduisent la valeur des courants en cas de défaut sont favorables à la stabilité, sous réserve que la présence des réactances n'augmente pas les écarts de phase entre les tensions extrêmes, ce qui rapprocherait de la limite de stabilité statique.

La disposition des lignes a son importance : dans un système de transmission à longue distance avec 2 lignes en parallèle, la condition de stabilité a amené l'idée de sectionner la ligne tous les 100 km, avec un point commun entre les 2 lignes et des disjoncteurs aux 2 extrémités de chaque section. En cas de trouble une section déclenche seule, et la variation de déplacement angulaire due à la variation de réactance qui se produit lors du déclenchement est moindre.

2. *Excitation rapide*

C'est la solution qui a été proposée par les constructeurs comme manière d'accroître la stabilité.

Il est important d'indiquer avec quelque détail le mécanisme des phénomènes pendant le régime variable avec excitation rapide, car ce point n'est pas toujours bien compris.

Supposons une baisse de tension aux bornes plus ou moins marquée due à un c. c. Le flux dans la machine synchrone ne suit pas la baisse de tension : un flux ne peut varier brusquement. Deux actions antagonistes s'y opposent :

- a) Les courants de Foucault induits ;
- b) Une brusque surintensité dans l'inducteur (plusieurs fois le courant en régime établi) apparaît dans la demi-période qui suit le c. c.

Le courant diminue ensuite jusqu'à reprendre sa valeur initiale suivant les caractéristiques transitoires du système dans un temps qui est de l'ordre de plusieurs secondes.

Ainsi dans la période transitoire, pendant laquelle l'instabilité est à craindre, il ne peut y avoir une grande variation de flux. L'idée de l'excitation rapide n'est pas d'augmenter l'excitation d'une valeur initiale bien définie à une autre valeur finale bien définie dans un temps très court (de l'ordre de dixièmes de seconde), car cette variation est automatiquement réalisée par le mécanisme que nous avons indiqué. L'excitatrice doit simplement atteindre très rapidement la nouvelle valeur de tension correspondant au courant d'excitation que l'on veut maintenir ; aucun retard additionnel dû à un effet de self dans le circuit qu'elle alimente, n'est à considérer. (L'effet de surintensité automatique dans l'inducteur dépend du couplage magnétique entre inducteur et induit ; il est d'autant plus marqué

que le couplage est plus serré, condition qui correspond à un rapport de court-circuit se rapprochant de l'unité comme l'a indiqué M. Fortescue.)

Ainsi la rapidité d'action de l'excitatrice est-elle suffisamment caractérisée par la vitesse de variation de sa tension aux bornes, suivant une pratique qui s'est établie.

Il est utile de mettre en garde contre l'objection suivante qui est parfois faite :

Supposons une baisse importante de tension due à un défaut. L'excitation doit alors produire une variation importante du flux dans la machine principale pour rétablir le flux normal. Or une variation de flux dans une grande machine synchrone est une question de secondes (de dizaines de secondes pour une variation étendue) comme il est facile de le vérifier : un alternateur tournant à vide, si on varie brusquement l'excitation excitatrice, la tension aux bornes de l'induit suit avec beaucoup de retard la tension aux bagues du rotor.

L'erreur de ce raisonnement résulte des considérations ci-dessus. Une baisse de tension de 20 pour cent, par exemple, est parfaitement compatible avec une baisse de flux négligeable.

Si l'on se reporte aux perturbations analysées précédemment on verra que l'excitation rapide est utile :

1° Dans le 2° cas de perturbation, parce qu'elle donne une limite de stabilité artificielle certainement supérieure à la limite de stabilité naturelle.

2° Dans le 3° cas de perturbation, parce que les différentes raisons qui retardent la brutalité de la variation (raisons que nous avons indiquées) laissent à l'excitation rapide le temps d'agir.

Il est essentiel d'utiliser, avec l'excitation rapide, un régulateur vibrant d'un type spécial, où la bobine est sous la dépendance de la tension aux bornes de la machine (tension à régler) et non de la tension d'excitation — de manière que l'effet de survoltage de l'excitatrice se continue encore après l'élimination du défaut, aussi longtemps que la tension aux bornes de la machine principale n'a pas repris sa valeur normale — sans s'occuper de la tension d'excitation qui peut monter très haut (l'excitatrice doit pouvoir atteindre 2 à 3 fois sa tension normale).

Il est également essentiel que le régulateur soit sous la dépendance d'un relais spécial avec lequel le régulateur fonctionne toujours dans le sens voulu en cas de défaut (tandis qu'avec le type ordinaire un

court-circuit sur une phase peut amener une surtension sur les autres phases ce qui actionne le régulateur en sens inverse de celui désiré).

A la suite de ces études d'excitation rapide et de la rapidité optima qui paraissait désirable, les Américains ont conclu à une excitation telle qu'on l'obtient avec une excitatrice pilote excitant séparément à tension constante l'excitatrice principale.

Ce système peut être établi pour donner une vitesse de variation de tension de 400 V par seconde dans la partie utile de la courbe, pour une excitatrice dont la tension normale est de l'ordre de 200 V. Il ne demande pas de régulateur très spécial, et ne représente qu'un supplément de dépense assez réduit. L'excitation est 3 à 4 fois plus rapide qu'avec excitatrice shunt ordinaire.

3. Disjoncteurs rapides

Les Américains ont porté d'autre part leur effort sur la réalisation de disjoncteurs rapides. Une opinion courante est qu'avec des disjoncteurs assez rapides il n'y aurait plus besoin d'excitation rapide.

Le temps nécessaire pour couper un défaut comprend en série :

1° Un temps entre l'instant où la faute apparaît avec une valeur suffisante pour actionner le relais et l'instant où le contact du relais se ferme.

Ce temps peut être plus ou moins long, selon l'action sélective du relais, le temps minimum étant 4 à 5 périodes.

Anciennement l'action sélective était obtenue en différant les relais; aujourd'hui, avec les relais modernes, un nouveau principe s'est établi : c'est le caractère même de la faute qui amène sa sélection et les relais n'ont plus à être différés.

(Les relais dont il s'agit sont connus sous le nom de relais à séquence de phase nulle, relais de terre dirigé, etc.)

2° Temps entre l'instant où le contact du relais se ferme et celui où les contacts principaux du disjoncteur commencent à se séparer. Ce temps est de l'ordre de 5 périodes ; il est dû aux inerties. Il est probable qu'on arrivera à le réduire.

Quand le disjoncteur n'est plus neuf — à la suite de variations de température, de manque d'entretien — ce temps peut augmenter beaucoup (cas fréquent avec les disjoncteurs type extérieur). Mais les constructeurs portent toute leur attention sur cette question — le mécanisme étant conçu avec des ressorts très puissants (4 à 5 fois la puis-

sance minima utile) et établi de façon à éviter tout choc en fin de course.

3° Temps nécessaire pour l'extinction de l'arc. Ce temps est de l'ordre de 3 à 6 périodes selon la tension, il augmente avec la tension. Il augmente encore si l'huile contient des particules de charbon qui s'alignent entre les contacts. On fait actuellement de nombreuses recherches et on espère arriver à couper dans la première alternance.

On voit donc que du côté disjoncteurs les progrès importants qui sont en cours auront une répercussion sur la question stabilité.

Conclusion générale sur le problème de la stabilité

1° Tout réseau important pose un problème de stabilité statique ; il est nécessaire que les lignes de transport de grande longueur soient étudiées, non seulement au point de vue rendement et régulation, mais encore au point de vue stabilité eu égard aux conditions du réseau plus ou moins étendu auquel elles apportent leur appoint d'énergie. A l'heure actuelle, on est en droit d'exiger une pareille étude des ingénieurs chargés du calcul des nouvelles lignes ; le problème est d'ailleurs difficile, comme je l'ai indiqué.

2° Il se pose ensuite un problème de stabilité transitoire qui ne peut être résolu par un calcul bien concluant. Non que tout calcul soit impossible, mais il implique de grandes simplifications initiales.

Cependant, au moment de commander ses machines, l'exploitant doit tenir compte des risques d'instabilité transitoire, et se prémunir contre ces risques. D'où 3 points à considérer.

1° Faut-il fixer pour les générateurs un rapport de court-circuit minimum comme font les Américains.

Alors, comment choisir ce minimum ?

Ou bien faut-il laisser le constructeur le choisir à sa guise, au mieux des intérêts de sa machine et pour le prix minimum de celle-ci ?

2° Faut-il adopter l'excitation rapide des générateurs ? Les exploitants américains disent : à l'heure actuelle nous avons peu de perturbations sérieuses. Installons l'excitation rapide qui n'est pas très coûteuse et tout n'en ira que mieux.

3° Faut-il adopter des disjoncteurs rapides ?

La réponse à ces 3 questions est une affaire de sentiment plus que de calcul précis.

Si l'on prend le maximum de précautions, dans ces 3 ordres d'idées, on aura un minimum de perturbations, voilà ce qu'on peut affirmer, et pour répondre aux 3 questions que je viens de poser je crois que les exploitants comme les constructeurs seraient fort en peine de justifier un opinion bien raisonnée.

III. — PRÉDÉTERMINATION DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT ET CHOIX DES DISJONCTEURS

L'exploitant qui connaît son réseau, après avoir calculé les courants de court-circuit, doit définir au constructeur d'appareillage le problème à résoudre et commander ses disjoncteurs.

Or cela n'est pas si facile ; les Américains ont eu de nombreux déboires et là encore leur expérience donne d'utiles indications.

Aussi, bien que le sujet soit devenu assez banal, je crois utile de rappeler leurs conclusions.

La première question, après avoir fixé la tension de service et le courant normal, est de fixer le courant maximum à couper par le disjoncteur.

Or le calcul du courant de court-circuit dans une branche d'un réseau complexe est délicat et incertain pour plusieurs raisons :

1° Dans le cas d'un réseau mis à la terre, l'impédance à la terre n'est connue qu'avec une grande incertitude ; on peut facilement se tromper de moitié.

2° Le calcul du courant instantané de court-circuit implique que l'on connaisse les réactances transitoires des machines. Or c'est là une question qui est encore à l'heure actuelle fort difficile, puisque l'analyse de cette question a conduit les Américains à distinguer une réactance transitoire et une réactance subtransitoire distinctes de la réactance de fuites. Les essais que l'on peut faire sur les machines ne donnent pas directement ces réactances, et il se pose des questions d'interprétation.

Les courants de court-circuit sont rarement triphasés symétriques. En général ce sont des courts-circuits de phase à neutre, dans les systèmes mis à la terre, ou des courts-circuits entre 2 phases voisines. La méthode de calcul quand les réactances transitoires sont connues est celle des coordonnées symétriques ; même en remplaçant le schéma réel du réseau par un schéma très simplifié on est conduit à des calculs longs et pénibles.

3° Quand on a calculé les courants de court-circuit instantané et permanent on passe de l'un à l'autre par une courbe de décroissement. Cette courbe est d'une détermination assez imprécise eu égard à l'amortissement.

Il résulte de cela que le courant maximum à couper est fort difficile à prédéterminer avec une exactitude convenable. Il est nécessaire de prendre de la marge : multiplier par un coefficient qui dépend de la confiance que l'on a dans le calcul, des hypothèses faites. Pour une installation existante on relève quelques oscillogrammes de court-circuit en différents points du réseau (principalement court-circuit monophasé) et on compare au calcul, pour en déduire un coefficient permettant de passer des valeurs calculées aux valeurs mesurées.

Le courant maximum étant déterminé, le problème n'est pas encore complètement défini pour le constructeur d'appareillage.

On a fait en effet les observations suivantes :

a) Pour un courant donné la longueur de l'arc de rupture dans le disjoncteur peut varier dans la proportion de 1 à 3 selon la place du disjoncteur dans le réseau, c'est-à-dire selon que le disjoncteur est plus ou moins voisin du générateur ou du récepteur. Cela tient à ce que la valeur de la tension qui apparaît entre contacts du disjoncteur après coupure, diffère avec les impédances en jeu ; la tension du générateur n'est plus sinusoïdale par suite des phénomènes de distorsion.

b) Il est bien connu que le décalage du courant sur la tension intervient dans les conditions de rupture et qu'un courant déwatté est plus difficile à couper qu'un courant watté, mais on a remarqué qu'il était plus difficile de couper un courant donné quand il est déwatté avant (courant de capacité d'une ligne haute tension) que quand il est déwatté arrière ; la longueur de l'arc est beaucoup plus grande. Cela tient aux effets de résonance qui se produisent dans un système doué d'inductance en présence d'une capacité, d'où déformation des courbes et accroissement considérable non pas du courant lui-même mais de son $\frac{di}{dt}$.

c) Dans le cas d'un système polyphasé le disjoncteur ne coupe pas les différentes phases exactement au même instant ; la précision mécanique nécessaire serait trop grande — et de plus un arc n'est pas un phénomène assez stable pour que l'extinction des arcs sur les 3 phases corresponde exactement à une même distance entre contacts. Du fait

de l'interruption successive des phases il se produit une action d'équilibrage des phases entre le circuit qu'on ouvre et le reste du système, ce qui a pour effet de modifier la valeur des courants.

d) Lors de l'interruption d'un arc il y a en général une superposition de deux fréquences : la fréquence du réseau et une fréquence oscillatoire élevée qui dépend des constantes du circuit et intervient dans le phénomène de la rupture.

On voit que toutes les conditions complexes du phénomène échappent à une analyse précise.

Il apparaît en conclusion que la capacité de rupture, qui est à priori une condition que l'exploitant doit fixer, est très délicate à déterminer pour un disjoncteur placé en un point du réseau. Ceci enlève à l'exploitant le droit d'être exigeant au sujet d'une garantie formelle. Cela a été compris en Amérique où le constructeur d'appareillage n'accepte de donner aucune garantie à ce sujet. Il donne à son client toutes les informations qu'il possède il accepte de répéter tous les essais que son installation permet mais ne garantit rien : un éclatement de disjoncteur peut entraîner des dommages sans proportion avec le prix de l'appareil lui-même, et qui peuvent être dus à des conditions particulières au réseau, ou qui dépendent de l'entretien.

La question ne peut être résolue que par une collaboration entre constructeur et exploitant, qui doivent se mettre d'accord pour choisir un type de disjoncteur en se basant sur la pratique d'exploitation acquise, entreprendre des essais en commun sur le réseau avec des enregistreurs oscillographiques. Il est nécessaire que l'exploitant dépense les sommes nécessaires à acheter ces appareils qui sont sa sauvegarde : c'est le seul moyen pour lui de savoir comment se comporteront les disjoncteurs dans son système particulier. Les Américains, après une longue période d'incertitude l'ont compris. Ils voient ce que leur coûtent en interruptions de service les disjoncteurs mal adaptés.

Il est à remarquer que la question d'un laboratoire central d'essais de disjoncteurs ne résout qu'une partie de la question : le rôle d'un tel laboratoire est de permettre au constructeur de remédier aux défauts les plus graves de ses appareils, mais il ne réalise que des conditions fictives qui ne dispensent nullement d'essais méthodiques sur le réseau lui-même.

Ainsi au réseau de Chicago, il y a en cours d'installation cent oscillographes enregistreurs automatiques à 4 équipages (valant chacun 35.000 frs environ) sur les principaux disjoncteurs.

IV. CONCLUSION

Les Américains, du fait de l'étendue de leurs réseaux, ont été amenés les premiers à reconnaître l'existence des phénomènes de stabilité statique et de stabilité transitoire. Nous en avons analysé les causes, qui sont fort simples et aideront à dissiper le mystère dont on se plaît à entourer ces questions.

Les différents moyens propres à réduire l'instabilité intéressent tous ceux qui, dans nos pays, étudient les transports de grande puissance à longue distance. Mais des conclusions nettes ne sont pas acquises.

D'autre part, l'extension des interconnexions entre centrales a posé avec une acuité particulière le problème des disjoncteurs ; les Américains se sont heurtés comme nous à la difficulté de déterminer la capacité de rupture requise aux différents points du réseau, et de déterminer le disjoncteur capable d'une capacité de rupture donnée.

En définitive ces deux problèmes : stabilité, disjoncteurs sont infiniment complexes. En pareille matière, l'expérience directe est quasi une impossibilité. Aussi la pratique ne permet-elle que de reconnaître des vérités d'ordre statistique : l'efficacité d'un dispositif n'étant démontrée que par une diminution du nombre des incidents dont les causes ne sont pas toujours bien établies.

L'esprit de collaboration avec lequel les constructeurs et les exploitants Américains abordent ces problèmes, est le principal trait qui mérite d'être retenu. Ce même esprit de collaboration, s'exerçant à tous les échelons des rapports industriels, est l'un des éléments principaux de la prospérité de leurs entreprises.

OUVRAGES OFFERTS

A LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

ECLAIRAGE ET CHAUFFAGE

Electrothermie appliquée, par ELUSIN GEORGES, édité par J.-B. Baillière, 19, rue Haute-feuille, Paris. Un ouvrage de 25×15,5 cm., broché, 370 pages, 1930 (Don des éditeurs).

APPAREILLAGE GÉNÉRAL. — TRACTION

Appareillage électrique, par L. LACROIX, Ingénieur, Editeur Albert Blanchard, 3 bis, place de la Sorbonne, à Paris. Un volume broché 18×11,5 cm. 587 pages. Année 1920. Prix 36 francs. (Don de l'éditeur.)

Contribution à la Traction électrique par accumulateurs, par CHALUMEAU M.-C., édité par la Société des Ingénieurs Civils de France, 19, rue Blanche, à Paris. Un ouvrage de 66 pages 24×15 cm., broché, 1929 (Don de la Société des Ingénieurs Civils de France).

TÉLÉGRAPHIE. — TÉLÉPHONIE. — TRANSMISSIONS PAR ONDES

Les Ondes électriques de très courtes longueurs et leurs applications, par GUTTON C., édité par Hermann et Cie, 6, rue de la Sorbonne, à Paris. Une brochure de 25×16 cm., 20 pages, 1930 (Don des éditeurs). Prix 4 fr.

Electro-Acoustique. Rapports de l'acoustique moderne et de l'électricité, par PIERRE DAVID, édité par Hermann et Cie, 6, rue de la Sorbonne, à Paris. Une brochure 25×16 cm., 40 pages, 1930 (Don des éditeurs). Prix 5 fr.

MATHÉMATIQUES

Erreurs et moindres carrés, par DELTEL R., édité par Gauthier-Villars et Cie, 55, quai des Grands-Augustins, Paris, 1930. Un ouvrage de 25×16,5 cm., broché, de 165 pages (Don des éditeurs).

ENSEIGNEMENT

Leçons d'électricité, par GÉRAUD ERIC, édité par Gauthier-Villars et Cie, 55, quai des Grands-Augustins, Paris. Un ouvrage en 4 volumes brochés : le 1^{er}, 509 pages, 1925, prix 40 fr. ; le 2^e, 495 pages, 1924, prix 40 fr. ; le 3^e, 585 pages, 1924, prix 45 fr. ; le 4^e, 660 pages, 1926, prix 40 fr. (Don des éditeurs).

Cours de mécanique, par PAINLEVÉ PAUL et PLATRIER CHARLES, édité par Gauthier-Villars et Cie, 55, quai des Grands-Augustins, Paris. Un ouvrage de 28×23 cm. broché, de 644 pages, 1929 (Don des éditeurs).

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

ENSEIGNEMENT

ERIC GÉRARD, Leçons d'Electricité professées à l'Institut électrotechnique Montefiore annexé à l'Université de Liège. Neuvième édition, revue et remise à jour, par LÉON BOUTHILLON, Ingénieur en chef des Postes et Télégraphes, et E. MAREC, Ingénieur diplômé de l'Ecole Supérieure d'Electricité. Quatre volumes in-8° de 25,5 × 16,5 cm de 510, 496, 586, 660 pages. Gauthier-Villars et Cie, Paris.

Les électriciens qui ont dépassé la cinquantaine se rappellent le succès éclatant des « Leçons d'Electricité » qui à la fin du dernier siècle répandirent la réputation d'Eric Gérard à travers le monde. C'était le premier ouvrage dans lequel on avait réussi à doser exactement la théorie et les applications de l'électricité, à donner à l'ensemble une forme attrayante et une rédaction claire. Nul doute que beaucoup de vocations d'ingénieurs électriciens ne furent déterminées par la lecture de cet ouvrage.

La présente édition est la première qui paraît après le décès d'Eric Gérard. Les deux volumes de 1890 ont été remplacés par quatre volumes comportant un total de 2.252 pages. On a sacrifié certaines parties vieillies, modifié ou complété certains paragraphes, ajouté des chapitres entièrement nouveaux pour que l'ouvrage soit toujours, comme le voulait l'auteur, au niveau de sa haute réputation.

Le premier volume, remanié par M. Bouthillon, expose les lois fondamentales de l'Electricité et du Magnétisme. On a en particulier refondu complètement la théorie des ondes électromagnétiques et ajouté une partie nouvelle où sont étudiées la science de l'électron et ses principales applications.

Les deuxième et troisième volumes, revus par M. Marec, traitent des dynamos à courant continu, des alternateurs, des transformateurs statiques et rotatifs, des lignes aériennes et souterraines, des lignes télégraphiques et téléphoniques, de l'appareillage, des centrales et postes de transformation, du transport et de la distribution de l'énergie électrique, des moteurs à courant continu et alternatif, de la traction électrique. Les élèves des Ecoles d'électricité seront très heureux d'y trouver des projets complets de dynamos, d'alternateurs et de transformateurs.

Le quatrième volume, revu comme le premier par M. Bouthillon, étudie les piles et accumulateurs, les appareils téléphoniques et télégraphiques, les radiocommunications, les méthodes d'émission et de réception radioélectriques, l'éclairage électrique, les compteurs, l'électrometallurgie et l'électrochimie. En particulier, la partie concernant les communications électriques est traitée avec la compétence que l'on peut attendre d'un Ingénieur en chef des Postes et Télégraphes.

Deux heures de Physique, par RIQUARD et JOLIOT. Un vol. broché de 240 pages, 12 × 19 cm. Editions Kra, 20, rue Henri-Regnault, Paris.

Cet ouvrage expose de façon élémentaire et avec des calculs réduits au strict minimum les principes de l'électricité statique.

La méthode employée consiste à suivre pas à pas les observations faites par les précurseurs de cette science : de la sorte la lecture de cet ouvrage ne présente aucune difficulté bien que les sujets abordés soient parfois d'une essence assez subtile.

On trouve également dans ce livre quelques chapitres constituant des digressions sur la pesanteur, la masse, la gravitation universelle, ainsi que sur certaines formes d'énergie.

Cet ouvrage sous son aspect élémentaire présente l'avantage de donner des matières exposées une idée très nette et d'éviter à l'esprit les fausses interprétations qu'un exposé plus mathématique risque parfois de provoquer.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS

SOMMAIRE

COMMUNICATION PRÉSENTÉE EN SÉANCE PUBLIQUE (1) :

Nouveaux oscillographes Blondel et leurs applications (M. VASSILLIÈRE-ARLIAC), p. 1152.

RAPPORTS PRÉSENTÉS A LA SEMAINE DE NOVEMBRE 1930 (1) :

Les pertes supplémentaires dans les moteurs asynchrones de petite puissance, (M. LE MONNIER), p. 1163. — Développement des câbles à grande distance en France, (M. PRACHE), p. 1178. — Appareils de mesure dans l'industrie radiologique, (M. PILON) p. 1188. — Tendances actuellement dans la construction et l'utilisation des transformateurs de mesure, (M. ILIOVICI), p. 1190.

RAPPORTS ANNUELS DE LA 2^e SECTION (1) :

Revue des principaux travaux exécutés sur la photométrie en 1929-1930, (M. JOUAUST), p. 1215. — Législation de l'éclairage, (M. PARTRIDGE), p. 1220. — Projecteurs et phares, p. 1221. — Lampes à incandescence, (M. GRANDJEAN) p. 1224. — Notes sur la construction d'enseignes auto-lumineuses à face verre cristal dit "Prisma" éclairées par transparence au moyen de lampes à incandescence, (M. FONSEQUE), p. 1227. — Luminaires et éclairages intérieurs, (M. H. J. DOURGNON), p. 1228. — Eclairage des studios, (M. H. G. CABET), p. 1230. — Les progrès de l'optique physiologique, (M. le Docteur E. HAAS), p. 1235.

TRAVAUX DES SECTIONS :

Traducteur Baudot non rotatif, système Eglin-Cartier, (M. BONNIN), p. 1248. —

ERRATA :

A la communication VAN DER POL sur "Les oscillations sinusoïdales et de relaxation", p. 1255.

GROUPE SUD-EST :

Résumé d'une communication présentée par M. DUVERNE, à Lyon, sur "Les transformateurs de réglage", p. 1256.

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ, p. 1260.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 1261.

IL Y A TRENTE ANS, p. 1262.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

La reproduction des mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des Auteurs.

Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant le manuscrit.
4^e série, tome X, n° 111.

NOUVEAUX OSCILLOGRAPHES BLONDEL ET LEURS APPLICATIONS ⁽¹⁾

par M. J. VASSILLIÈRE-ARLHAC

Directeur des Services électriques aux Ateliers J. Carpentier

L'extension croissante de l'utilisation des courants alternatif amena M. BLONDEL à imaginer, dès 1893, une méthode directe et rapide pour l'étude des courants variables, au moyen de galvanomètres spéciaux auxquels il donna le nom d'*oscillographes*.

Ceux-ci caractérisés par des dimensions extrêmement petites et des dispositions spéciales de l'équipage mobile, en particulier sa réduction à deux fils parallèles, lui permirent d'atteindre des périodes d'oscillation propres, très réduites, inférieures au $\frac{1}{10000}$ de seconde, et même dans certains cas au $\frac{1}{30000}$ de seconde.

Dès cette époque les galvanomètres furent amortis à l'apériodicité critique, au moyen d'une huile appropriée de consistance réglable.

Le galvanomètre bifilaire et le galvanomètre à bande de fer doux tordue sont entrés depuis dans la pratique des laboratoires et de l'industrie, et, à l'heure actuelle, les oscillographes de M. BLONDEL, modifiés suivant le goût des Constructeurs, sont universellement connus.

Le modèle de galvanomètre bifilaire, couramment réalisé, a une fréquence propre de 4 000 périodes par seconde avec une résistance de 1,5 ohm ; lorsque l'on opère dans le champ d'un électro-aimant la fréquence propre peut être portée à 12 000 p. s., la résistance de l'équipage étant alors de 2 ohms.

Les miroirs utilisés normalement sont des miroirs ayant pour dimensions 0,6 × 0,6 mm.

Lorsque l'on désire effectuer des projections on utilise des miroirs de 2 × 2 mm en ajoutant un dispositif optique spécial.

Le galvanomètre à bande de fer doux tordue a une fréquence propre qui peut atteindre 40 000 p. s.

(1) Communication présentée en séance publique de la Société Française des Électriciens le 1^{er} mars 1930.

Très nombreuses sont déjà les applications qu'ont reçues les oscillographes de M. BLONDEL dans tous les domaines de l'industrie.

Nous citerons tout d'abord l'étude des déformations des ondes de courant dans les alternateurs.

Par combinaison de 2 oscillographes avec un double prisme entre eux, M. BLONDEL a également réalisé un hystérésigraphe permettant de tracer directement des courbes à coordonnées rectangulaires. Cet appareil est également utilisé par la Télégraphie Militaire pour l'inscription des courbes de lampes triodes.

Dès 1901, M. BLONDEL réalisa au moyen de l'oscillographe le premier enregistrement de la parole sous forme de courbes.

Plus tard MM. DEVAUX-CHARBONNEL, COEN, SHEPHERD, BELA GATI et MM. BLONDEL et POLAK utilisèrent cette méthode pour l'étude des courants microphoniques ou des microphones eux-mêmes.

Les cellules photo-électriques devaient permettre d'arriver à la réalisation fort intéressante du cinématographe parlant grâce à la combinaison de l'appareil ingénieusement réalisée par MM. LUMIÈRE et de l'enregistrement microphonique de M. BLONDEL, un équipage bifilaire étant utilisé pour l'inscription et une cellule photo-électrique pour la réception (Système GAUMONT, PETERSEN et POULSEN).

L'étude du fonctionnement des disjoncteurs tant au point de vue de la fermeture que de la rupture a été réalisée en 1904 par M. BLONDEL et a donné lieu ensuite à de nombreux essais, notamment ceux de CREIGHTON.

Nous mentionnerons ceux réalisés tout récemment par M. BRANCHU sur le nouveau disjoncteur-limiteur ultra-rapide des Etablissements MERLIN et GÉRIN.

Plus tard en 1907, au moyen de l'oscillographe, M. BLONDEL étudia les émissions par étincelles musicales en T.S.F., puis en 1911, la transmission par l'eau des signaux acoustiques ; ces signaux sont généralement produits au moyen de cloches immergées comme dans l'expérience célèbre de COLLADON.

Ils sont recueillis au moyen d'un microphone immergé, relié à un téléphone écouteur.

En combinant l'oscillographe avec un microphone de réception, M. BLONDEL réalisa la syntonisation acoustique et électrique, étant entendu que le téléphone récepteur doit être mis en syntonie électromécanique avec la fréquence des signaux émis, avant d'être utilisé sur le microphone.

En 1912, ceci conduisit l'auteur à l'étude de l'enregistrement oscillographique des explosions, anticipant ainsi les méthodes qui ont été employées pendant la Guerre pour le repérage des canons ennemis.

Dans les enregistrements d'oscillogrammes, il est utile de pouvoir enregistrer périodiquement le temps pour l'étude de certains phénomènes.

Cette question fut résolue par le dispositif électrochronométrique de M. BLONDEL, avec étincelles lumineuses éclairant pendant un instant très court la fente ou la lentille placée devant la bande photographique qui impressionne cette dernière.

Pour produire ces étincelles à des intervalles parfaitement réguliers et de durée connue, l'auteur fit vibrer le trembleur d'une bobine d'induction au moyen d'un courant réglé par électro-diapason et muni de l'ingénieux dispositif de M. GUILLET.

Le dispositif d'étincelles, synchronisé avec électro-diapason rend très précise la méthode électro-photographique et permet de nombreuses utilisations telles que l'enregistrement et la mesure des vibrations sonores, l'émission d'étincelles musicales de fréquences rigoureusement constantes en T.S.F., l'envoi de signaux vibrés sur des lignes télégraphiques ou téléphoniques.

Peu de temps avant la guerre M. BLONDEL réalisa un oscillographe à enregistrement continu automatique des surtensions pour lequel il prit un brevet.

Il prévoyait déjà le rôle important que serait appelé à jouer l'oscillographe dans la surveillance des réseaux de distribution d'énergie électrique.

L'appareil et les expériences commencées ne purent avoir de suite du fait de la guerre.

Elles ont été reprises beaucoup plus tard pour nous revenir de l'Etranger.

Nous mentionnerons également l'analyse harmonique des courbes de force électromotrice des alternateurs consistant à relever non pas l'onde même de l'alternateur, mais une courbe transformée ou transfigurée de cette onde et de telle sorte que les harmoniques supérieures y figurent avec des amplitudes multipliées par des facteurs connus.

Nous rappellerons que la transfiguration de la courbe est réalisable soit :

par *amplificateur thermoïonique*,
par *condensateur*,

par *transformateurs* en combinaison avec un amplificateur à triodes.

La méthode par condensateur est facile à réaliser et résout très pratiquement le problème, car elle permet d'obtenir des courbes transformées qui donnent facilement les valeurs précises des harmoniques 5 à 15 et surtout des harmoniques 5 et 7 particulièrement intéressantes dans l'étude des alternateurs.

L'utilisation du galvanomètre bifilaire a été également indiquée par M. BLONDEL pour l'enregistrement des courants des lampes triodes en augmentant la sensibilité par l'emploi d'un transformateur d'intensité que l'on branche dans le circuit plaque.

Il est bien entendu que ce transformateur est construit comme un transformateur amplificateur à coefficient de transformation à peu près constant pour toutes les fréquences usuelles, tandis que pour l'analyse harmonique il faut des transformateurs spéciaux.

Nous ne manquerons pas de mentionner les travaux remarquables effectués par M. MAUDUIT à l'aide de l'oscillographe Blondel sur le phénomène complexe de la commutation, travaux qui ont servi et servent de base aux études actuellement en cours sur cette question.

Récemment, MM BOGOLIOBOF et KRYLOFF ont repris l'étude concernant la valeur à donner à l'amortissement dans l'inscription d'une courbe.

M. BLONDEL a indiqué que le meilleur moyen de connaître l'erreur commise dans l'inscription d'une courbe donnée, était de tracer la courbe vraie d'après la courbe relevée $y = A.cq$ en retranchant de chaque point de son ordonnée les termes correctifs :

$$A \sum \frac{dq}{dt} - Am \frac{d^2q}{dt^2}$$

ceci permet de déduire un procédé de correction automatique en produisant dans les oscillographes des courants induits proportionnels aux dérivées première et seconde au moyen d'un ou plusieurs transformateurs ou condensateurs.

BUSCH a donné une expression générale très simple du résidu dans le cas où les décalages de phase restent faibles.

Si τ est la phase, qui est la même pour les différentes harmoniques en nombre assez peu élevé, l'erreur résiduelle en amplitude est

$$\frac{\tau^3}{1.2.3.} q''' + \frac{\tau^4}{1.2.3.4.} q'''' \text{ etc....}$$

Il y a lieu de signaler les analogies et différences présentées par l'oscillographe compensé et le rhéographe employé par M. ABRAHAM.

Dans celui-ci l'élongation est proportionnelle à la dérivée seconde du courant ou de la tension enregistrée, tandis qu'une correction est faite proportionnellement à la dérivée première et que le couple est négligeable

Dans l'oscillographe compensé au contraire, le terme principal du premier membre reste le terme de torsion et les termes proportionnels aux dérivées ne jouent que le rôle de corrections.

En 1920, M. BLONDEL réalisa l'enregistrement oscillographique des variations rapides de vitesse, en ailmentant l'oscillographe par une dynamo unipolaire légère montée sur l'arbre dont la vitesse doit être relevée.

Nous ne terminerons pas cet exposé sans mentionner trois applications récentes de l'oscillographe :

La première est celle qu'a faite M. FOURNIER sur le réseau de la Sidérurgie Lorraine pour l'étude du fonctionnement des moteurs à gaz dans les stations centrales métallurgiques du bassin de Briey.

Les essais ont porté sur des moteurs à 4 cylindres à double effet, fonctionnant sur le cycle à 4 temps et tournant à 94 tours par minute.

Chaque moteur actionnait un alternateur-volant marchant en parallèle avec d'autres alternateurs mûs par moteur à gaz et avec des sous-stations équipées par groupe turbo-alternateur.

Le dispositif de mesure utilisé ainsi que les diagrammes obtenus ont fait l'objet d'une intéressante communication de M. SEKUTOWICZ à la première section de la Société Française des Electriciens ⁽¹⁾.

Il est bien entendu que les essais sont qualitatifs et il serait intéressant de les reprendre pour obtenir des résultats quantitatifs.

Ainsi que M. SEKUTOWICZ l'a signalé, des incidents provoquant des battements ont eu comme cause des allumages intempestifs.

Ceci présente un intérêt particulier au point de vue de l'application de l'oscillographe de M. BLONDEL au contrôle du fonctionnement des moteurs à gaz eux-mêmes.

Une seconde application est celle de M. CELLERIER au Laboratoire National des Arts et Métiers, dans les études qu'il a faites relatives aux

(1) Communication du 7 février 1930, insérée dans le bulletin N° 108 d'août 1930, 4^e série, Tome X

sons musicaux ; étude du son fondamental et de ses harmoniques, ainsi qu'étude du nombre de fréquences des sons simples.

Les travaux de M. CELLERIER ont également porté sur la détermination de la valeur absolue des sons entre eux en intensité efficace.

Les récents travaux de M. SARTORIO, à la Compagnie Lorraine d'Electricité, sur les moteurs à double cage présentent un réel intérêt non seulement en ce qui concerne le fonctionnement de ces moteurs, mais également pour leur construction.

Les recherches de M. SARTORIO ont porté particulièrement sur le passage étoile-triangle ; à cet effet le moteur à double cage d'écureuil entraînait une génératrice à courant continu à excitation indépendante, débitant sur une résistance fixe déterminée.

Le courant traversant le moteur à double cage, ainsi que la tension de la génératrice étaient mesurés au démarrage.

Il a ainsi déterminé que l'à-coup de courant lors du passage étoile-triangle est supérieur à celui provoqué par le démarrage.

De ces oscillogrammes se déduisent également des régimes différents de la marche des moteurs, ces différences ayant pour cause des différences de résistance rotorique.

M. SARTORIO a également étudié la temporisation d'une bobine à minima de tension, un condensateur de 5 μ F étant branché aux bornes de cette bobine.

Cette étude présente également un intérêt remarquable pour préciser les constantes de réglage des bobines sur les disjoncteurs.

D'autres essais de M. SARTORIO sur la détermination des défauts de câbles au moyen de la méthode du cadre directeur sont actuellement en cours.

Nous n'avons fait que rappeler dans les grandes lignes quelques-uns des faits importants en oscillographie et nous nous excusons de ne pouvoir nous étendre dans ce domaine considérable auquel de nombreux savants et ingénieurs de tous pays ont apporté leur collaboration.

Oscillographe portatif de M. Blondel

Le nouvel oscillographe portatif de M. BLONDEL représenté par la figure 1 présente l'avantage sur les différents modèles actuellement

connus, de réunir sous un volume particulièrement réduit, de poids minimum, tous les organes d'observation, de commande et de protection.

Il rend possible l'enregistrement d'oscillogrammes sur bandes de 10 m dans les cas normaux en même temps que l'observation simultanée sur plaque dépolie.

Ceci est rendu possible grâce au système optique particulièrement lumineux de ce nouvel appareil.

La figure 2 représente en élévation et en plan schématique le système optique.

Un avantage également remarquable de ce nouvel appareil est de rendre possibles les enregistrements d'oscillogrammes sans source de

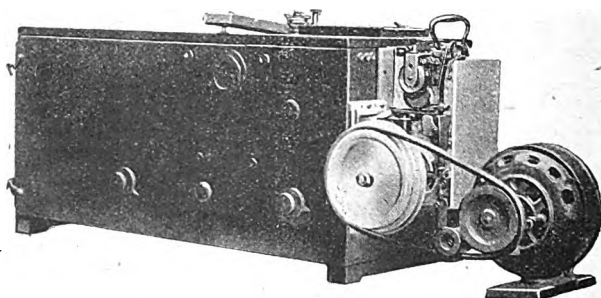


Fig. 1. — Dimensions d'encombrement : 770×350 mm, haut : 345 mm.

courant continu et au moyen d'une lampe spéciale à filament rectiligne.

L'appareil peut être équipé soit avec aimant permanent soit avec électro-aimant.

Dans des conditions de réalisation normales et avec électro-aimant, la fréquence des équipages bifiliars est portée à 12 000 p.s.

Dans ce cas la résistance propre de l'équipage est de 2 ohms.

Le synchronoscope comporte une nouvelle disposition adoptée par M. BLONDEL pour le moteur synchrone. Ce dernier est à 6 pôles bobinés et du type à self-induction variable. Il porte sur son axe un interrupteur tournant comportant un collecteur sur lequel frottent 2 balais mis en série avec le stator.

Ces balais sont shuntés par un rhéostat de démarrage variable dont la manœuvre permet la synchronisation automatique.

A la vitesse normale de synchronisme le moteur synchrone est accroché à 1 000 tours ; il peut l'être également à la moitié de cette vitesse en faisant varier la position des balais de l'interrupteur tournant.

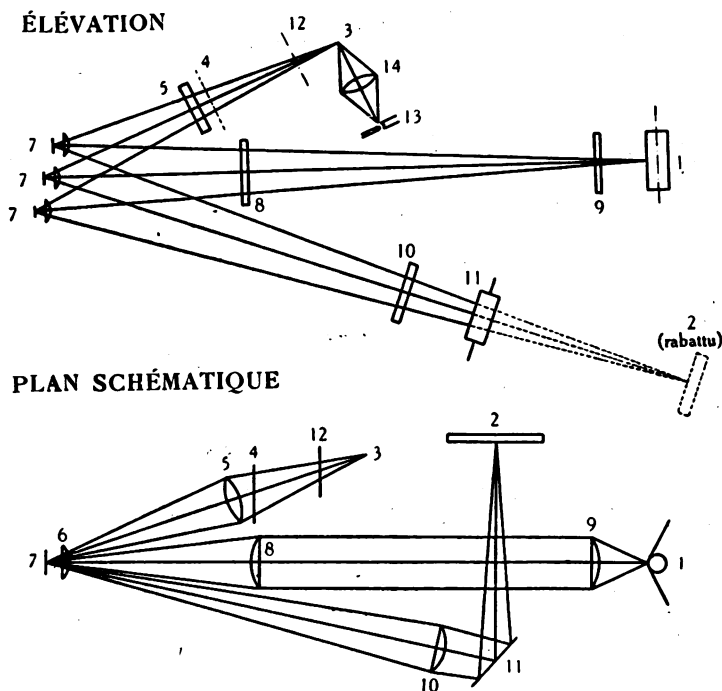


Fig. 2

- 1 Enregistreur dérouleur.
- 2 Verre dépoli.
- 3 Lampe à filament rectiligne ou prisme à réflexion totale.
- 4 Diaphragme à fentes.
- 5 Lentille de projection cylindrique.
- 6 Lentille plan convexe sphérique.
- 7 Miroirs d'équipage.
- 8 Lentille cylindrique rendant parallèles les pinceaux lumineux.

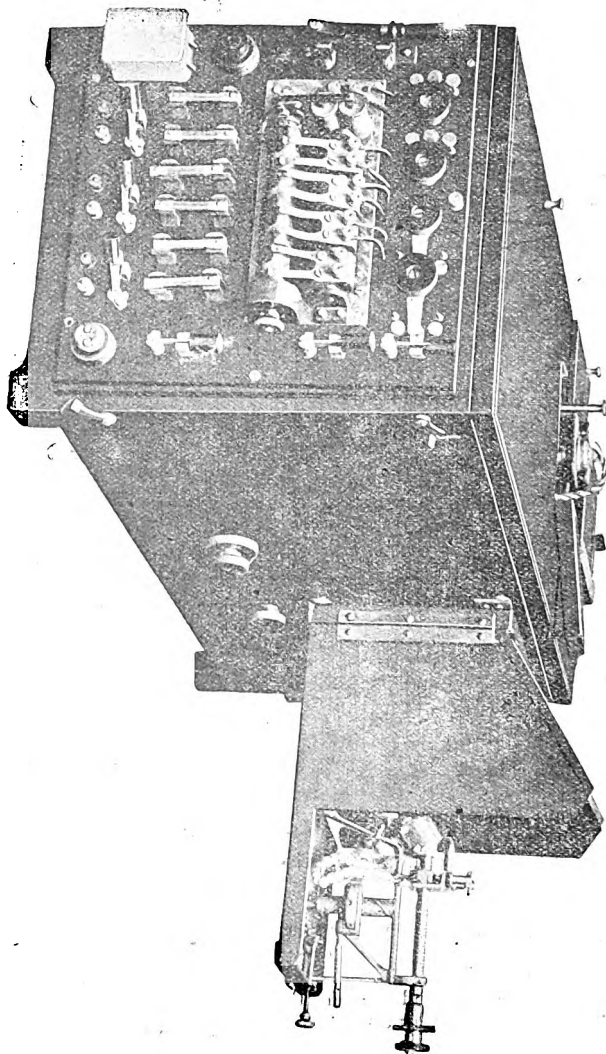
- 9 Lentille cylindrique concentrant les rayons lumineux sur le film.
- 10 Lentille cylindrique formant le spot sur le verre dépoli.
- 11 Miroir de synchronoscope.
- 12 Fentes du volet dont les images produites par les miroirs (7), forment les spots.
- 13 Gratière de l'arc.
- 14 Lentille sphérique formant l'image de l'arc sur le prisme à réflexion totale.

Pour la demi-vitesse de rotation l'on peut observer 3 périodes et demie sur le verre dépoli, chaque période étant représentée sur une longueur de 3 cm.

Le nouvel enregistreur-dérouleur permet la prise d'oscillogrammes sur rouleaux sensibles de 10 m.

Il se compose d'une boîte en aluminium à l'intérieur de laquelle sont montés 2 rouleaux amovibles ; le rouleau supérieur jouant le rôle de rouleau magasin, et celui inférieur le rôle de rouleau récepteur.

Fig. 3. — La lampe à arc et le tableau de commande (après enlèvement de son couvercle).



Un compteur permet de régler d'avance la longueur du film que l'on désire utiliser.

Enfin grâce à un électro-aimant qui agit sur un levier d'embrayage spécial la mise en marche et l'arrêt du dérouleur peuvent être provo-

qués à distance et synchronisés avec la mise en circuit ou hors circuit de l'appareillage que l'on désire étudier, tel que par exemple des disjoncteurs ou des commutatrices.

Un petit tableau de distribution situé à la partie inférieure de l'appareil et représenté par la figure 3 comporte les circuits d'entrée des galvanomètres avec leurs interrupteurs et fusibles de protection. Ces derniers sont situés à la partie inférieure du tableau.

Au dessus des fusibles se trouve un commutateur tournant qui permet de tracer les lignes de zéro des 3 équipages pendant un temps très court à l'instant initial de la mise en route du dérouleur, puis avant son arrêt.

Ce même commutateur permet de réaliser le renforcement instantané de l'éclairement de la lampe à filament rectiligne. Dans certaines observations rapides cette lampe à filament rectiligne est remplacée par une lampe à arc d'un modèle soit à main soit automatique.

Cette lampe est représentée également sur la figure 3 à droite.

Oscillographe à 6 équipages

Le nouvel oscillographe à 6 équipages de M. BLONDEL comporte l'oscillographe, avec électro-aimant extérieur à 6 équipages.

Les tableaux de manœuvre sont montés en dehors de l'appareil ; l'ensemble est monté sur une table portative d'un maniement facile.

Nous mentionnerons que le nouveau modèle portatif de M. BLONDEL comporte normalement un dérouleur permettant des enregistrements à une vitesse moyenne de 4 mètres par seconde.

Un second modèle permet des enregistrements à une vitesse de 12 à 15 m:s.

Pour répondre à certains besoins de l'industrie, les Ateliers CARPENTIER ont construit parallèlement au modèle portatif en bois un modèle entièrement métallique.

Dans ce modèle, tous les circuits électriques sont très soigneusement isolés et disposés en dessous de l'appareil sur un plateau isolant facilitant le montage et assurant un parfait isolement.

Oscillographe automatique

Dans ce modèle, la boîte de l'appareil est de même forme et de mêmes dimensions que celles du modèle portatif, toutefois l'étan-

chété à la lumière est renforcée afin d'éliminer tout risque de voile de la bande de papier photographique. La boîte ne comporte aucune ouverture et les équipages sont réglés une fois pour toutes.

La réalisation de l'appareil est considérablement simplifiée et le dérouleur photographique est d'un modèle spécial, continuellement entraîné par moteur électrique fonctionnant sur le courant du secteur.

Dans ce cas, ce dérouleur est constitué par un tambour à grand diamètre tournant à une vitesse continue de 1 m:s.

La source de lumière est constituée par une lampe à filament rectiligne dont le filament, en service normal, est simplement porté au rouge sombre.

Au moment où se produit un incident d'exploitation sur le réseau contrôlé par l'oscillographe automatique, un relai spécial instantané agit sur les 3 circuits suivants :

a) Circuit de la lampe à incandescence :

La résistance en série montée avec la lampe est court-circuitée et provoque un survoltage de la lampe au moment de l'enregistrement ;

b) Circuit de l'obturateur :

Ce circuit est fermé sur un accumulateur qui provoque l'ouverture de l'obturateur ;

c) Circuit d'un relai à action retardée : environ 5 secondes après la mise en marche du fonctionnement de l'oscillographe.

Un dispositif avertisseur signale au moment de l'enregistrement que l'appareil a fonctionné. Il y a lieu de procéder alors au remplacement du papier photographique monté sur le tambour enregistreur.

Un prototype de dimensions très réduites fut réalisé dès 1914 par M. BLONDEL, qui pressentait déjà toute l'importance de cette question : le contrôle oscillographique automatique.

LES PERTES SUPPLÉMENTAIRES DANS LES MOTEURS ASYNCHRONES de PETITE PUISSANCE ⁽¹⁾

par M. LE MONNIER

INTRODUCTION

L'étude des imperfections des machines électriques — et plus spécialement des pertes qui sont à la fois une source d'échauffement et une cause de diminution du rendement — constitue l'une des plus graves préoccupations des Constructeurs.

Il est donc naturel de voir revenir périodiquement ce sujet au cours des discussions de la Première Section. Elle en fut saisie en dernier lieu en octobre 1926 par le rapport très complet de M. RICALES ⁽²⁾, qui donna lieu à une longue discussion ⁽³⁾.

L'année suivante, à l'occasion de la communication ⁽⁴⁾ que je présentais à la Semaine d'Octobre sur « la signification physique de la tension de réactance dans les machines à champ tournant », la question fut soulevée à nouveau et la discussion ⁽⁵⁾, qui s'en suivit, fit apparaître des divergences de vues assez profondes.

Si l'on est d'accord pour reconnaître que la loi d'Ohm et l'effet Joule sont impuissants à expliquer les causes des pertes qui prennent naissance dans une machine en charge, c'est-à-dire dans un moteur, quand on lui fait produire un travail mécanique ou dans une génératrice quand on lui fait fournir une puissance électrique, le désaccord commence quand il s'agit d'apprécier l'importance des pertes supplémentaires en charge et plus encore d'en préciser l'origine.

Les uns attribuent ces pertes surtout aux inégalités de répartition du courant dans les conducteurs massifs parcourus par des courants

(1) Ce rapport sera présenté et discuté au cours de la Semaine de discussions le mercredi 26 novembre.

(2) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, 4^e Série, Tome VI, n° 60, août 1926, pp. 809-840.

(3) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, 4^e Série, Tome VII, pp. 61 à 70.

(4) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, 4^e Série, Tome VII, n° 70, pp. 709-717.

R. G. E., 16 juillet 1927, Tome XXII, pp. 101-108.

(5) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, 4^e Série, Tome VIII, n° 79, mars 1928, pp. 265-269.

alternatifs. On est amené, en effet, à envisager une résistance apparente des conducteurs plus grande que la résistance mesurée en courant continu et d'autant plus grande que la fréquence est plus élevée. Il est incontestable que l'on touche bien là à l'une des sources des pertes supplémentaires et il est évident aussi que ces pertes — pertes supplémentaires dans le cuivre — seront d'autant plus importantes que les conducteurs auront des sections plus fortes, c'est-à-dire que les machines envisagées seront de puissance plus élevée. Il s'ensuit logiquement que, pour des machines de petite puissance n'utilisant que des fils ronds de section relativement faible, les pertes supplémentaires dans le cuivre sont très réduites et par suite négligeables.

D'autres estiment que les pertes supplémentaires prennent naissance en grande partie dans le circuit magnétique de la machine et plus spécialement dans les zones actives, c'est-à-dire dans les zones du circuit magnétique qui bordent, de part et d'autre, l'entrefer. Ces pertes — pertes supplémentaires dans le fer — seraient dues aux impuretés des champs magnétiques dont la machine est le siège.

Dans les machines synchrones ou asynchrones à courants polyphasés, on se représentera facilement ces impuretés par l'existence de couronnes polaires à $2 Kp$ pôles — $2 p$ étant le nombre de pôles dans la machine — balayant le circuit primaire — en général stator — à la fréquence d'alimentation f et l'inducteur ou circuit secondaire — en général rotor — lorsqu'il est au synchronisme à des fréquences égales respectivement à $(K \pm 1) \times f$. Ces couronnes polaires dans leur mouvement provoquent, d'une part, des pertes dans le fer du circuit magnétique et, d'autre part, des forces électro-motrices dans l'enroulement primaire qui donnent naissance en partie à la tension de réaction.

Ces pertes supplémentaires dans le fer subsistent toujours dans les machines et même, à l'encontre de ce qui se passe pour les pertes supplémentaires dans le cuivre, elles sont relativement plus développées dans les machines de petite puissance, parce que l'on ne peut pratiquement construire ces dernières avec autant de perfection que les machines de grande puissance.

Les pertes supplémentaires totales, du fait de la présence des pertes dans le fer, ne seraient donc négligeables en aucun cas. C'est la thèse que j'avais soutenue en 1927.

Dans la réponse très documentée qu'il fit à ma communication, M. Belfils s'appuyant sur un calcul classique, nous a montré que les

valeurs des amplitudes des harmoniques du champ induit sont tellement faibles que, d'une part, la portion de la tension de réactance induite par ces champs est pratiquement très faible *même dans les cas les plus défavorables* et que, d'autre part, les pertes dans le fer dues au déplacement des couronnes polaires sont également négligeables.

Ces conclusions me semblent cependant en contradiction avec maints faits d'expérience que l'on observe journellement. Je me propose donc aujourd'hui d'analyser quelques-uns de ces faits d'expérience les plus caractéristiques et les plus démonstratifs, ce qui doit nous amener à réviser les bases de nos calculs, car ceux-ci, tout exacts qu'ils soient, ne nous rendent que ce que nous y avons mis. Si nous avons omis, dans les données physiques du problème quelque élément, le calcul nous conduit à des conclusions trompeuses.

J'ai choisi, comme terrain d'expérience, les moteurs asynchrones de petite puissance, c'est-à-dire les machines dont l'emploi est le plus répandu aujourd'hui et sur lesquelles les essais sont faciles à faire. Dans ces machines, il semble bien que les pertes supplémentaires dans le cuivre soient négligeables ; si donc on y décèle des pertes supplémentaires, ce seront vraisemblablement des pertes supplémentaires dans le fer.

ETUDE DU COUPLE AU DÉPART D'UN MOTEUR ASYNCHRONE

Dans la première série d'essais que je vais analyser, nous allons voir, en étudiant le couple au départ d'un moteur asynchrone, comment on peut arriver à peser ces pertes supplémentaires prétendues impondérables.

J'envisagerai tout d'abord le cas d'un moteur asynchrone triphasé en court-circuit de 5 ch à 4 pôles, 50 p/s, 200 V, avec montage en triangle du circuit d'alimentation.

Effectuons l'essai en court-circuit au repos de ce moteur, sous tension réduite, de façon à éviter de faire passer dans les enroulements des courants trop élevés qui risquent, en provoquant des échauffements excessifs, d'apporter quelque incertitude sur les valeurs des résistances et par suite de troubler les résultats de l'essai. Pour une tension par phase U , on relève un courant par phase I , sous un facteur de puissance égal à $\cos \varphi$. La chute ohmique dans l'enroulement stator sera égale par phase à $R_s \times I$ et la tension interne par phase aura

Pour éliminer cette incertitude, on avait pris la précaution d'exécuter le bobinage du rotor en fil isolé de 1,2 mm de diamètre dont on avait pu mesurer la résistance en courant continu.

Malgré cette précaution, l'essai en court-circuit effectué sur le moteur que nous avons étudié, nous a donné une résistance de 1,75 ohm, tandis que la valeur calculée ramenée au stator en se servant de la résistance mesurée en courant continu et du rapport de transformation est de 1.48 à la température de l'essai. Cet écart s'expliquerait s'il existait des pertes supplémentaires dans le fer qui correspondraient d'ailleurs plutôt à une résistance supplémentaire du bobinage stator qu'à une résistance supplémentaire du bobinage rotor.

Il est facile de s'en assurer : toute la puissance réellement perdue dans le bobinage rotor fournit le couple sur l'arbre du moteur. En mesurant le couple sur l'arbre avec un frein, on va pouvoir contrôler la *résistance réelle* du bobinage rotor. Pour être interprété correctement, cet essai nécessite cependant une correction. En effet, le couple fourni par le rotor doit non seulement faire équilibre au couple mesuré par le frein correspondant au poids P , mais encore vaincre la résistance au départ dans les paliers. On peut déterminer la valeur de cette résistance passive en mesurant le poids minimum p , qu'il faut appliquer au frein pour provoquer le décollage du rotor quand on n'alimente pas le stator. Le couple total fourni par le rotor sera donc celui qui correspond au poids $P+p$. Pour le moteur essayé, la résistance ramenée au stator du bobinage rotor déduite du couple total fourni par le rotor, est égale à 1,5 ohm. La concordance avec la valeur calculée est alors aussi parfaite que possible.

Nous avons ensuite répété l'essai, en substituant au bobinage rotor en fils isolé, un bobinage en barres nues de forte section dont la résistance ne pouvait être déterminée avec la même sécurité que dans le cas précédent. On trouve alors respectivement pour la résistance du bobinage rotor déduite de l'essai en court-circuit et déduite de l'essai au frein, des valeurs de 2,15 et 1,9 ohm. La résistance apparente à 50 périodes du nouveau bobinage rotor est donc plus élevée que la résistance du premier, mais *la différence entre les deux valeurs est restée la même*, c'est-à-dire que les pertes supplémentaires sont restées les mêmes, ce qui, si l'on admet que les pertes supplémentaires ont leur siège dans le fer, s'explique tout naturellement puisque, lors de ces deux essais, le circuit magnétique est resté le même.

Pour le moteur envisagé les pertes supplémentaires seront égales à : $3 \times 0,25 \times I_u^2$, ou bien : $3 \times 0,22 \times I^2$ en les exprimant de préférence en fonction du courant stator. Il ne faut pas oublier que cette expression n'est valable que pour le moteur au repos. En marche normale les fréquences dans le fer du rotor sont profondément modifiées et par suite aussi les pertes. La résistance du bobinage stator étant de 1,31 ohm à chaud, les pertes supplémentaires dans le fer au repos sont donc éga-

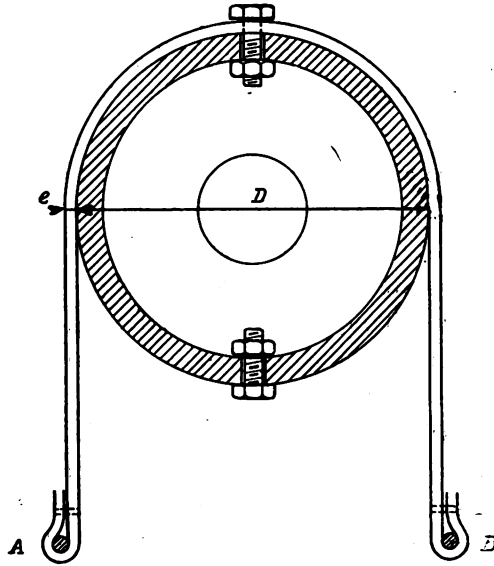


Fig. 2.

les à 17 0/0 des pertes par effet Joule dans le bobinage stator, ce qui n'est pas négligeable.

DISPOSITIF D'ESSAI

Pour opérer avec sécurité, on avait pris quelques précautions particulières que nous allons décrire.

Le moteur était muni d'une poulie cylindrique de grand diamètre. Sur cette poulie une sangle ou une courroie souple était fixée en son milieu le long d'une génératrice, comme l'indique la figure 2. Les deux extrémités portaient deux tiges semblables auxquelles on pouvait suspendre des poids. Enfin deux butées encadrant ces tiges limitaient les déplacements possibles de la poulie de part et d'autre de sa position d'équilibre.

L'appareil étant dans sa position d'équilibre, on commençait, sans alimenter le stator, par charger le brin A avec le poids p nécessaire pour provoquer le décollage du rotor, puis on recommençait la même opération en chargeant le brin B. On prenait comme valeur du poids p la moyenne des deux valeurs ainsi relevées, qui d'ailleurs ne différaient pas sensiblement.

Pour déterminer le couple de démarrage, on attachait au brin A le poids maximum P que le rotor pouvait entraîner quand on appliquait dans le sens convenable une tension déterminée au stator. On prenait la précaution d'alimenter le moteur avec une source assez puissante pour éviter toute chute de tension et par suite toute incertitudes sur la valeur de la tension. On recommençait la même opération en renversant le sens d'alimentation et fixant le poids P au brin B. On prenait comme valeur définitive P la moyenne des deux valeurs ainsi obtenues. Le bras de levier du frein était égal à $\left(\frac{D}{2} + e\right)$.

Dans l'essai précédent, la longueur du bras du levier était de 0,1025 m, de sorte que le couple exprimé en watts à 1 500 t/m, était égal à :

$$C = (P + p) \times 0,1025 \times \frac{2 \times 3,14 \times 1.500}{75 \times 60} \times 737 = 158 \times (P + p),$$

($P + p$) étant exprimé en Kgs.

MALENTENDUS SUR LA VALEUR DU COUPLE AU DÉMARRAGE RÉSULTANT DE L'EXISTENCE DES PERTES SUPPLÉMENTAIRES

Nous allons voir immédiatement comment l'existence de ces pertes peut causer des malentendus très fâcheux.

Nous allons étudier le fonctionnement de notre moteur au départ lors du démarrage en étoile à 200 V, c'est-à-dire en appliquant une tension de 116 V par phase. Le diagramme de la fig. 1 a été tracé précisément pour ce point de fonctionnement.

Le courant I_a est dans ce cas égal à 19 ampères. Le couple réel fourni par le rotor (muni du premier bobinage) est égal à $3 \times 1,5 \times 19^2 = 1\,630$ W à 1 500 tours. Le couple disponible sur l'arbre ne sera que de $1\,630 - 16 = 1\,614$, car le couple propre de décollage du rotor qui était monté sur roulements à billes n'était que de 16 W à 1 500 tours. D'autre part, la puissance transmise au rotor, si l'on

ne tient pas compte des pertes supplémentaires, comme on le fait d'ordinaire, est égale à :

$$3 \times 1,5 \times \overline{19}^2 + 3 \times 0,25 \times \overline{19}^2 = 1\,630 + 270 = 1\,900 \text{ W.}$$

L'écart entre le couple réel sur l'arbre (1614) qui intéresse seul l'usager et le couple apparent (1900) déduit de l'essai en court-circuit dont le Constructeur se contente, en général, sans le préciser, atteint donc 18 pour cent. On voit que l'écart est déjà très appréciable quoiqu'il s'agisse cependant d'un moteur à pertes supplémentaires relativement faibles et dont le rotor est monté sur roulements à billes.

Le second exemple que nous allons donner sera plus caractéristique encore. On a répété les mêmes essais sur un moteur Boucherot à double cage de 5,5 ch, 4 pôles, 50 périodes, 210 V ; on a trouvé respectivement des valeurs de 3 ohms et de 3,5 ohms pour la résistance du rotor déduite de l'essai au frein et la résistance déduite de l'essai en court-circuit. Les pertes supplémentaires sont donc égales à $3 \times 0,5 \times I_a^2$ ou bien égales à $3 \times 0,44 \times I^2$. Elles sont donc *sensiblement doubles* des pertes supplémentaires du moteur précédemment étudié. Ce moteur était, en outre, muni de paliers lisses avec graissage à bagues dont la raideur au départ est beaucoup plus grande que celle d'un moteur muni de roulements à billes. Comme il s'agit d'ailleurs d'un moteur à double cage, les dimensions en sont plus fortes que celles du moteur ordinaire, de sorte que le couple au départ du rotor seul, lorsque le stator n'est pas alimenté, atteint 200 W à 1 500 t/m (au lieu de 16).

Lors du démarrage en étoile à 210 V, c'est-à-dire pour 121 V par phase, le courant utile I_a est égal à 16,8 ampères (diagramme de la figure 3).

Le couple réel fourni par le moteur est égal à :

$$3 \times 3 \times \overline{16,8}^2 = 2\,500 \text{ W à 1 500 t/m.}$$

Le couple disponible sur l'arbre ne sera que : $2\,500 - 200 = 2\,300$.

La puissance transmise au rotor, si l'on néglige les pertes supplémentaires atteint : $3 \times 3 \times \overline{16,8}^2 + 3 \times 0,5 \times \overline{16,8}^2 = 2\,500 + 420 = 2\,920 \text{ W}$. L'écart entre le couple réel (2 300) et le couple déduit de l'essai en court-circuit (2 920) atteint cette fois 27 pour cent. Si l'on s'en tient à la seconde valeur, on constate que le couple au départ est égal à 0,67 fois le couple normal — c'est sensiblement la garantie que donne le constructeur du moteur à double cage — alors qu'en réalité le couple sur l'arbre n'est que de 0,53 fois le couple normal.

Rien dans les Règles actuelles ne met en garde contre cette confusion, car si, lors des Réunions de la C.E.I. à Londres en 1929, on a songé à fixer les valeurs des tolérances sur les mesures des couples au démarrage ⁽¹⁾, on a omis de définir de façon claire et précise le procédé de détermination de ce couple, de sorte que les tolérances envisagées (10 à 20 pour cent suivant les propositions) se trouvent inférieures aux écarts possibles entre les résultats des divers procédés de mesure.

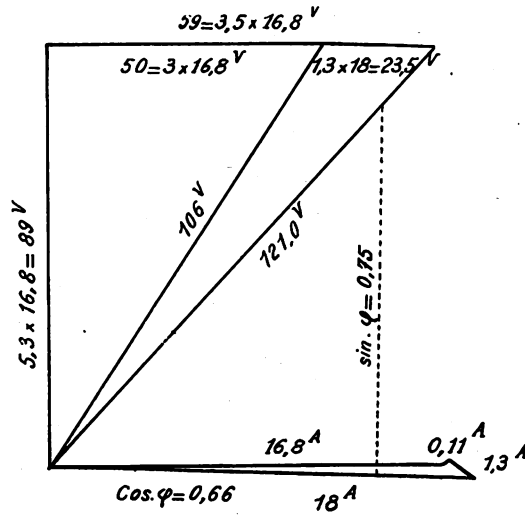


Fig. 3.

ÉTUDE COMPARÉE DES PERTES RÉELLES EN FONCTIONNEMENT NORMAL DANS UN MOTEUR ASYNCHRONE SUIVANT LE MODE DE RÉALISATION

Dans la première série d'essais que nous venons d'analyser, nous avons mis en évidence, dans le cas particulier d'un moteur au repos, l'existence de pertes supplémentaires très appréciables, même pour des moteurs d'une puissance de 5 ch seulement et les conditions dans lesquelles a été fait l'essai ne permettent pas de rechercher la source de ces pertes ailleurs que dans le circuit magnétique.

Nous nous proposons maintenant de déceler l'existence des pertes supplémentaires dans le fonctionnement normal en charge et de mon-

(1) R. G. E., 9 novembre 1929, tome XVII, page 747.

trer, en outre, que ces pertes sont en liaison avec la tension de réactance.

Nous avons utilisé dans ce but un moteur triphasé d'une puissance de 20 ch à 4 pôles, 50 périodes, 200 V, avec montage en triangle du circuit d'alimentation, et nous allons comparer deux réalisations différentes de ce moteur.

Dans les deux cas, les dispositions et dimensions mécaniques resteront exactement les mêmes : diamètre extérieur du stator, diamètre

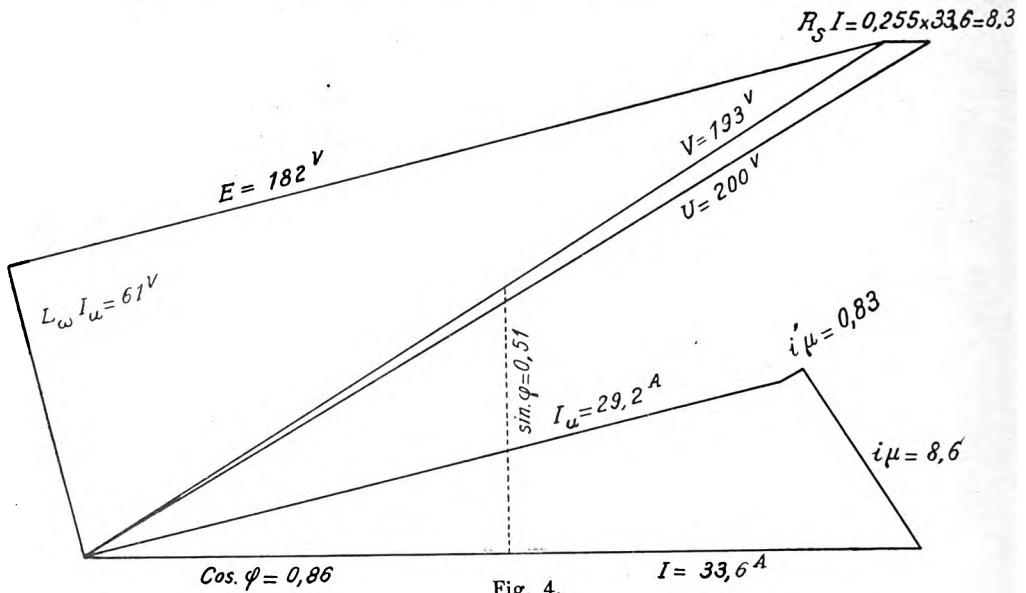


Fig. 4.

d'alésage du stator, largeur du fer, entrefer et rotor, seront identiques, de même que les dimensions du bâti, des paliers, des couvre-fils et le dispositif de refroidissement. D'autre part, les bobinages stator seront semblables, c'est-à-dire comporteront le même nombre de spires total par phase avec le même embrassement angulaire et les mêmes sections des conducteurs.

Dans le premier cas, le stator comportait 6 encoches par pôle seulement. Pour une puissance absorbée de 17,2 kW sous 200 V, le moteur avait un facteur de puissance de 0,86 et un glissement de 5,3 pour cent.

La détermination des résistances du stator, d'une part, des éléments du fonctionnement à vide, d'autre part, permet de tracer le diagramme pour ce régime (fig. 4).

Pour un courant utile de 29,2 A, la tension de réactance est de 61 V et les pertes apparentes dans ce moteur s'établissent comme suit :

Pertes mécaniques	150 W
Pertes dans le fer : $3 \times 193 \times 0,83$	480,—
Pertes par effet Joule dans le bobinage stator : $3 \times 8,3 \times 33,6$.	835,—
Pertes par effet Joule dans le bobinage rotor :	
$0,053 \times 3 \times 182 \times 29,2$	840,—
Pertes totales	2 305 W

$$\text{Rendement : } \frac{17,2 - 2,3}{17,2} = \frac{14,9}{17,6} = 0,865$$

Dans le second cas, le stator comportait deux fois plus d'encoches, soit 12 encoches par pôle et les dimensions en étaient telles que la perméabilité du circuit magnétique était la même tout en conservant radialement la même hauteur aux encoches.

Quelle que soit l'interprétation que l'on y donne — réduction des harmoniques de champ ou diminution des fuites — la tension de réactance de ce second moteur aurait été beaucoup plus faible que celle du premier. Ce moteur aurait donc un fonctionnement tout différent de celui du premier, quoique constitué d'un circuit magnétique et de bobinages de mêmes caractéristiques principales ; en particulier le facteur de puissance serait plus élevé et le glissement moindre.

Nous avons alors fait subir à ce moteur une transformation simple, de façon à lui donner la même tension de réactance qu'au premier *en agissant uniquement sur les fuites*. Pour arriver à ce résultat, nous avons eu recours à un artifice bien connu qui, comme les produits que manient les pharmaciens est remède à certaines doses, mais devient poison à d'autres doses : nous avons utilisé l'inclinaison des encoches — procédé d'usage courant pour rendre plus uniforme le couple au démarrage des moteurs en court-circuit — en l'exagérant jusqu'à provoquer des fuites qui relèvent la tension de réactance à la valeur de 61 V pour un courant utile de 29,2 A.

Il est évident qu'en procédant ainsi nous ne modifions en rien les impuretés du champ. Si les impuretés ont une influence négligeable, comme on le prétend, on aura réalisé de la sorte deux moteurs qui seront absolument équivalents comme fonctionnement. On constate,

en effet, que le second a un facteur de puissance et un glissement sensiblement égaux à ceux du premier, mais on constate également que les échauffements de ces deux moteurs sont très différents. Le premier moteur à la même charge de 17,2 kW atteint des échauffements de 20 pour cent plus élevés que le second.

Comment admettre alors que les pertes réelles sont les mêmes ? N'est-on pas obligé d'admettre encore une fois l'existence de pertes supplémentaires très appréciables qu'il n'est pas permis de négliger comme on l'a fait dans le décompte précédemment établi ?

Les enroulements étant d'ailleurs constitués de la même façon, il est difficile d'admettre que la variation constatée se produise dans le cuivre. C'est donc bien dans le fer que doivent prendre naissance ces pertes supplémentaires.

Les essais comparés de ces deux moteurs montrent, en outre, qu'il y a deux façons tout à fait distinctes de réaliser une même tension de réactance ou mieux un même supplément de tension de réactance. Dans le premier cas envisagé, ce supplément de tension de réactance est accompagné d'une augmentation considérable des pertes supplémentaires dans le fer. Dans le second cas où nous savons que la tension de réactance a été obtenue uniquement par augmentation des fuites magnétiques, les pertes supplémentaires sont faibles.

Ces derniers essais, effectués en recourant à des dispositions quelque peu artificielles, nous semblent bien mettre en évidence, d'une part l'existence des pertes supplémentaires dans le fer, et d'autre part la relation entre ces pertes supplémentaires dans le fer et la tension de réactance, qui ne s'expliquent bien l'une et l'autre qu'en admettant la présence d'harmoniques du champ magnétique.

CONCLUSIONS

En résumé, on est donc tenté d'admettre l'interprétation suivante du fonctionnement des moteurs asynchrones qui nous fournit une explication satisfaisante de ces résultats d'expérience :

1° la tension de réactance dans les moteurs asynchrones est due, soit aux fuites, soit aux impuretés des champs magnétiques,

2° les pertes dans les moteurs asynchrones résultant du fonctionnement en charge sont dues aux pertes par effet Joule dans les enroulements dont la détermination est facile et à des pertes supplémentaires d'importance très variable et rarement négligeables. Ces

pertes supplémentaires peuvent prendre naissance *dans le cuivre* par suite des irrégularités de répartition du courant dans les conducteurs ou *dans le fer* du circuit magnétique en raison des impuretés des champs qui balayent l'entrefer et les zones actives.

3° les pertes supplémentaires dans le cuivre sont négligeables dans les moteurs de petite puissance et peuvent être atténuées dans les moteurs de moyenne et grande puissance par un sectionnement et une disposition convenables des conducteurs,

4° les pertes supplémentaires dans le fer ne sont que très rarement négligeables et peuvent souvent prendre une importance considérable. Elles dépendent essentiellement de la construction du moteur et différeront dans des proportions notables d'un moteur à un autre de même puissance, mais de construction différente.

Conséquences pratiques. — L'existence des pertes supplémentaires rend donc complètement illusoire et même trompeuse la notion de *rendement apparent* à laquelle on accorde encore tant d'importance. C'est en effet la détermination de ce rendement apparent que fixent, en général, les réglementations en vigueur qui vont même jusqu'à prévoir les tolérances à admettre lors du contrôle des garanties données par le Constructeur. Or, si nous reprenons les exemples précédents, nous constatons que l'examen des rendements apparents conduit à des jugements parfaitement injustes sur la valeur des moteurs.

Dans le cas des moteurs de 5 ch que nous avons examinés, nous avons vu que les pertes supplémentaires au repos sont deux fois plus fortes dans le moteur à double cage que dans le moteur ordinaire. Ces pertes supplémentaires au repos ne sont pas, il est vrai, les mêmes en valeur absolue que les pertes supplémentaires en fonctionnement normal, mais il est vraisemblable que leurs valeurs relatives restent sensiblement les mêmes et que ces dernières sont plutôt plus élevées que les premières. Le rendement apparent du moteur à double cage considéré (81 pour cent) est inférieur à celui du moteur ordinaire (84,5 pour cent) ; surtout en raison de la valeur élevée des pertes mécaniques. Pour faire la comparaison à conditions égales, admettons que le moteur à double cage soit muni de roulements à billes comme le moteur ordinaire et que les pertes mécaniques soient les mêmes dans les deux cas. On obtient alors des rendements apparents de 84 pour cent et de 84,5 pour cent. L'écart semble donc faible, mais si l'on tient compte des pertes supplémentaires, même en adop-

tant les valeurs déduites de l'essai au repos, on trouve respectivement 81 pour cent et 83 pour cent. L'écart est donc très appréciable. Cette augmentation des pertes ne sera d'ailleurs pas trahie par la valeur des échauffements parce que le moteur à double cage étant de dimensions beaucoup plus grandes que le moteur ordinaire, peut dissiper des pertes plus élevées.

L'exemple des moteurs de 20 ch est encore plus instructif. On pourra avec des échauffements identiques fournir avec le premier de ces moteurs une puissance de 16 ch seulement alors qu'avec le second — construit normalement sans incliner les encoches — on atteindra 20 ch. Le rendement apparent du moteur de 16 ch sera légèrement plus élevé que le rendement du moteur de 20 ch, alors qu'en réalité c'est le rendement vrai du moteur de 20 ch qui est le plus grand des deux.

Une comparaison superficielle fera donc préférer le moteur le plus médiocre, mais le plus lourd et la considération du rendement apparent jettera le discrédit sur le matériel le meilleur auquel un préjugé trop répandu appliquera, en raison de ses dimensions, l'expression péjorative de « Matériel poussé ».

C'est là que réside le côté dangereux de l'erreur que l'on commet en négligeant les pertes supplémentaires, car, si l'on y persistait, on paralyserait complètement la technique et l'on interdirait tout progrès dans la construction du matériel électrique. La recherche du plus léger a été pour d'autres industries la cause de progrès considérables et l'on ne voit pas pourquoi il n'en serait pas de même pour l'industrie électrique.

C'est pourquoi je me suis permis de soulever à nouveau la question devant la Première Section, espérant que les faits d'expérience que j'ai cités, faciles à contrôler et qui trouvent d'ailleurs leur confirmation dans maintes autres observations analogues, provoqueraient en France quelques efforts pour s'affranchir d'une confusion aussi contraire à l'esprit et à la langue et rénover des règles un peu vieilles, prêtant à des malentendus graves, tant au sujet des couples de démarrage, que des rendements.

SUGGESTIONS

Comme il serait contraire à la destinée du Constructeur de se contenter d'avoir tant démolì ou tout au moins tant critiqué, je me crois obligé de fournir maintenant quelques suggestions constructives.

Tout d'abord, en ce qui concerne le calcul classique rappelé au début, il me semble que c'est dans l'expression même de l'onde de la force magnéto-motrice, qu'il faut chercher le défaut qui nous conduit à des résultats en désaccord avec l'expérience. Cette expression ne tient aucun compte de la présence des encoches et des dents, et elle serait la même pour une machine à induit cylindrique sur lequel le bobinage serait concentré le long de certaines génératrices et pour la machine à induit denté présentant des encoches aux points où les bobinages sont concentrés. Cependant ces deux machines ne se comporteraient certainement pas de la même façon. Il faut reconnaître, il est vrai, que le calcul semble assez délicat à aborder si l'on veut tenir compte de l'influence du fer et c'est probablement par des recherches expérimentales que l'on pourra, tout d'abord, atteindre les valeurs réelles des harmoniques du champ.

En second lieu, il semble que l'on ne puisse aborder l'étude des rendements réels que par l'analyse des échauffements qui permettront d'évaluer directement les pertes totales. Cette méthode tout à fait générale, semble la seule applicable, en particulier, pour les moteurs asynchrones qui ne se prêtent pas aux essais en récupération. Elle peut paraître d'une application trop malaisée pour les besoins de la pratique. Cependant il semble qu'elle pourrait être aménagée assez aisément, pour les moteurs de construction courante, en disposant d'un moteur étalon sur lequel serait fait l'essai calorimétrique et avec lequel on se contenterait ensuite de comparer les machines identiques à l'aide d'essais simples à vide et en court-circuit.

Enfin, en ce qui concerne la détermination des couples au démarrage, il suffira de préciser nettement que le seul couple dont il s'agit est celui qui est réellement disponible sur l'arbre et que l'on peut mesurer avec un frein de Prony.

DÉVELOPPEMENT DES CABLES A GRANDE DISTANCE EN FRANCE ⁽¹⁾

par M. PRACHE

SOMMAIRE

- I — Généralités.
 - 1. Définition du niveau de transmission. Valeurs limites. Affaiblissement.
 - 2. Fréquence de coupure. Qualité de la transmission. Echos et phénomènes transitoires.
- II. — Différents types de circuits.
 - 1. Circuits à quatre fils. Charge moyenne. Charge légère.
 - 2. Circuits à deux fils. Point d'amorçage. Portée maximum.
 - 3. Circuits de radiodiffusion.
 - 4. Circuits de télégraphie harmonique.
- III. — Différents types de câbles français.
 - 1. Câble Paris-Strasbourg.
 - 2. Câble Paris-Lille.
 - 3. Câble Paris-Bordeaux.
 - 4. Câbles à un seul calibre de conducteurs.
- IV. — Conclusion.

Les spécifications des câbles à grande distance français ont subi pendant ces dernières années des modifications importantes. Pour nous rendre compte des raisons qui les ont motivées, étudions rapidement un projet de câbles.

I. — GÉNÉRALITÉS

1. *Niveau de transmission.* — Les ingénieurs qui s'occupent de la transmission et de l'enregistrement du son ont pris l'habitude d'évaluer les rapports de puissance sous forme logarithmique. Divers systèmes d'unités ont été proposés à ce sujet. On peut, de façon analogue, évaluer les puissances elles-mêmes en se référant à une puissance déterminée prise pour base. La puissance s'exprime alors en « Niveau de transmission ».

Dans le système logarithmique ordinaire, par exemple, si l'on prend pour référence une puissance de un milliwatt qui correspondra par définition au niveau zéro, une puissance de 10 milliwatts correspon-

(1) Ce rapport sera présenté et discuté au cours de la Semaine de discussions de novembre, le samedi 29 novembre 1930.

dra au niveau 1, une puissance de 100 milliwatts correspondra au niveau 2, etc. Les niveaux sont alors exprimés en « Bels ».

Limites de niveau. — Les amplificateurs à lampes à vide permettent à l'heure actuelle d'obtenir une amplification pratiquement illimitée du courant sonore. Dans les studios d'enregistrement par exemple, les amplificateurs placés entre le microphone et le haut parleur témoin assurent entre ces appareils une différence de niveau de l'ordre de 130 Décibels, ce qui correspond à une amplification en puissance de 10^{13} .

Nous sommes en droit de nous demander tout d'abord pourquoi ces grandes amplifications ne sont pas utilisées en téléphonie. Elles permettraient en effet de ne faire usage que de fils de très petit calibre, tout en espaçant considérablement les stations d'amplificateurs, ce qui rendrait la construction très économique. Nous allons voir que plusieurs raisons conduisent à maintenir le niveau de transmission sur les câbles dans des limites relativement étroites.

La première est qu'on ne peut descendre au-dessous d'un certain niveau par suite des influences extérieures et en particulier de l'induction électromagnétique des lignes d'énergie voisines du câble. Les bruits induits en un point seront en effet d'autant plus amplifiés que la puissance sonore transmise en ce point est plus faible.

D'autre part, le niveau est limité vers le haut par la puissance maximum que peuvent débiter sans distorsion les lampes à vide utilisées. On pourrait élever ce niveau en utilisant de plus grosses lampes, mais une autre considération intervient alors : la différence de niveau entre circuits voisins est en effet limitée par les conditions imposées pour éviter la *diaphonie*. Par suite des imperfections de construction (défauts de symétrie), une faible partie des courants qui circulent sur un circuit se dérive sur les circuits voisins. Le mélange de conversations ou diaphonie qui en résultera sera d'autant plus gênant que le niveau du circuit perturbateur est plus élevé et le niveau du perturbé plus faible.

Dans l'état présent de la technique, on admet que le niveau des courants téléphoniques ne doit pas descendre au-dessous de 30 décibels et que, à moins de précautions spéciales, la différence de niveau entre circuits voisins ne doit pas être supérieure à 20 à 30 décibels. Au voisinage des stations, le câble comporte simultanément des communications qui viennent d'être amplifiées et sont au niveau maximum, et des communications qui vont être amplifiées et sont au ni-

veau minimum. La condition précédente oblige donc à limiter le gain des amplificateurs et par suite l'affaiblissement des tronçons entre stations à 30 décibels environ.

L'affaiblissement kilométrique du câble chargé s'exprime en fonction de la résistance, l'inductance et la capacité kilométriques des conducteurs par la formule approchée :

$$b = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

C et L étant fixés par les considérations qui vont suivre, cette formule permet de déterminer R, c'est-à-dire la section des conducteurs en fonction de l'espacement des stations et de l'affaiblissement total imposé entre stations.

3. *Fréquence de coupure.* — On sait qu'un câble pupinisé se comporte comme un filtre passebas, c'est-à-dire ne transmet que les courants de fréquence inférieure à une certaine valeur limite dite fréquence de coupure.

Cette fréquence détermine la qualité des communications échangées sur le câble. L'intelligibilité sera d'autant plus parfaite que cette fréquence sera plus haute. Mais, en revanche, le prix de la ligne sera d'autant plus élevé. On a donc cherché à déterminer expérimentalement la bande de fréquences qu'il y avait lieu de transmettre pour obtenir une bonne audition commerciale ; on a admis jusqu'à présent que cette bande devait nécessairement comprendre les fréquences de 300 à 2 000 périodes par seconde.

La fréquence de coupure d'un câble pupinisé s'exprime en fonction des constantes kilométriques et de l'espacement des points de charge par la relation

$$f = \frac{1}{\pi d \sqrt{LC}}$$

Le mode de construction des câbles ne permet pas de faire varier la capacité dans de grandes proportions. On a intérêt, pour obtenir une fabrication bien homogène, à maintenir cette capacité à une valeur assez élevée. Une faible diminution de cette constante entraînerait d'ailleurs, outre des irrégularités de construction, une augmentation très sensible du diamètre et par suite du prix du câble.

En ce qui concerne l'espacement des points de charge, on a cherché jusqu'alors à le standardiser à une valeur uniforme pour la facilité de fabrication et d'interconnexion des artères. En France,

cette valeur a été fixée à 1 830 mètres. Dans ces conditions, on est amené, pour obtenir la fréquence de coupure prévue ci-dessus à donner aux bobines une inductance de 175 millihenrys.

Echos et phénomènes transitoires. — La transmission sans distorsion de la bande de fréquences prévue ci-dessus n'est pas toujours suffisante pour assurer une bonne audition. Sur les longs circuits, d'autres phénomènes interviennent pour diminuer l'intelligibilité. Ce sont d'abord les échos qui sont dus au fait qu'une partie des courants de conversation se réfléchissent à l'extrémité de la ligne pour revenir vers l'auditeur ou l'interlocuteur. Ils deviennent gênants dès que le temps de propagation aller et retour dépasse un seizième de seconde.

Les phénomènes transitoires sont dus à la diminution de la vitesse de propagation au voisinage de la fréquence de coupure. Sur une ligne de fréquence de coupure f_0 , la vitesse à la fréquence f est donnée par la relation

$$V = 2 \pi f_0 \frac{\frac{f}{f_0}}{\arcsin \frac{f}{f_0}}$$

Il en résulte que les fréquences voisines de la fréquence de coupure parviennent à l'auditeur après les fréquences basses ; sur les longs circuits, cet effet pourra être si marqué que les fréquences basses d'une syllabe parviendront en même temps que les hautes de la précédente, supprimant ainsi toute intelligibilité.

Pour éviter ces inconvénients, on peut intercaler sur les circuits à quatre fils des supprimeurs d'écho qui interrompent la transmission dans un sens pendant qu'on parle sur l'autre. De même, on a récemment mis au point des *compensateurs de phase* qui sont des lignes artificielles dont la caractéristique de phase est inverse de celle du câble, c'est-à-dire qui retardent les fréquences basses. Ces compensateurs permettent d'uniformiser la vitesse de propagation dans la bande de fréquences transmises et par suite de supprimer les phénomènes transitoires.

On peut également atténuer considérablement les échos et phénomènes transitoires en élevant la fréquence de coupure des circuits de grande longueur, de façon à éloigner la bande transmise de cette fréquence et augmenter la vitesse de propagation.

II. — DIFFÉRENTS TYPES DE CIRCUITS

1. *Circuits à quatre fils.* — Pour les longues communications, on utilise uniquement les circuits dits à quatre fils sur lesquels les courants de conversation circulent sur des paires différentes à l'aller et au retour, le regroupement s'effectuant à chaque extrémité au moyen d'un transformateur différentiel. Sur ces circuits, les amplificateurs sont donc unidirectionnels et leur gain n'est limité que par les considérations ci-dessus relatives à la diaphonie. Les deux principaux types de circuits utilisés en France sont :

1° Les circuits à charge moyenne sur lesquels la charge est réalisée au moyen de bobines de 175 millihenrys. La portée de ces circuits est limitée à 700 kilomètres environ par les échos et phénomènes transitoires. Cette portée peut être accrue par l'emploi de supprimeurs d'écho et de compensateurs de phase.

2° Pour les distances supérieures, on utilise de préférence les circuits à charge légère sur lesquels la charge est réalisée au moyen de bobines de 44 millihenrys, ce qui correspond à une fréquence de coupure de 5 600 p.s. Pour les très longues distances, ces circuits doivent également être munis de supprimeurs d'écho et compensateurs de phase.

2. *Circuits à deux fils.* — Les circuits à deux fils qui sont beaucoup plus économiques que les précédents sont seuls utilisés pour les courtes et moyennes distances. L'amplificateur à deux fils est bien connu. La figure 1 en donne une représentation schématique. Le gain maximum de ces amplificateurs est limité non seulement par les conditions imposées pour la diaphonie, mais encore par les défauts d'uniformité longitudinale des câbles auxquels ils sont raccordés. Tout défaut de cette nature tel qu'une variation dans la capacité des circuits ou l'inductance des bobines entraîne une réflexion de courant. Si, par exemple, le courant principal se propage dans le sens Ouest-Est (fig. 1), les irrégularités du tronçon Est donneront naissance à un courant réfléchi qui traversera la lampe inférieure et se propagera ensuite sur le circuit Est. Mais les irrégularités sur ce dernier circuit entraîneront à leur tour la production de nouveaux courants réfléchis qui, selon la rotation de l'angle de phase pendant le parcours, s'ajouteront ou se retrancheront du courant principal. C'est en somme un phénomène analogue à celui de la réaction dans les postes de T.S.F. Cette réaction sera évidemment d'autant plus importante que le gain

de l'amplificateur sera plus élevé. Il arrivera même un moment où des oscillations s'amorceront spontanément dans l'ensemble amplilignes. On a donné le nom de point d'amorçage au gain pour lequel ces oscillations se produisent. Il est bien évident que, si le gain était maintenu juste au-dessous du point d'amorçage, la parole serait pro-

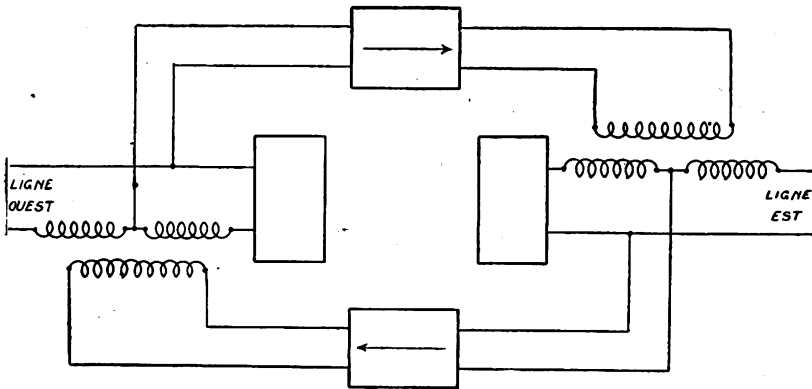


Fig. 1.

fondément déformée, car, selon le signe de l'angle de phase qui dépend lui-même de la fréquence, le courant principal sera amplifié ou affaibli par le courant de réaction. On est donc tenu de limiter le gain de l'amplificateur à un certain intervalle au-dessous du point d'amorçage.

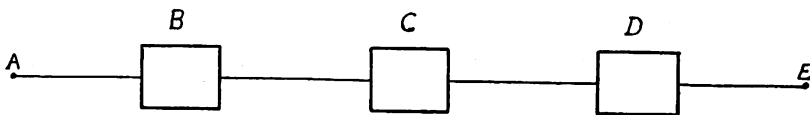


FIG. 2

Si nous considérons maintenant une ligne qui comporte plusieurs amplificateurs à deux fils (fig. 2), un amplificateur donné sera influencé non seulement par les réflexions de courant dans les deux tronçons adjacents, mais encore par les réflexions dans les tronçons éloignés. Un défaut d'uniformité sur le tronçon DE par exemple produira un courant réfléchi qui traversera en s'y amplifiant l'amplificateur D et viendra influencer l'amplificateur C. Si, comme c'est forcément le

cas sur les longs circuits, le gain des amplificateurs est sensiblement égal à l'affaiblissement des tronçons, il est facile de voir que l'effet sur l'amplificateur C d'un défaut sur DE sera aussi important que celui d'un défaut au point correspondant de CD puisque le gain de l'amplificateur D compensera l'affaiblissement du tronçon. Il en résulte que, pour des câbles de qualité donnée, le point d'amorçage sera d'autant plus bas qu'il y aura plus d'amplificateurs sur la ligne. La nécessité de maintenir l'intervalle considéré plus haut limite donc le nombre d'amplificateurs sur les circuits à deux fils, et par suite la portée de ces circuits. Nous allons voir que l'on a pu, au cours de ces dernières années accroître cette portée par une amélioration de la fabrication.

3. *Circuits de radiodiffusion.* — Un problème qui a pris récemment une grande importance est celui du relais des stations de radiodiffusion par transmission des programmes sur les câbles à grande distance. Ce problème est beaucoup plus complexe que celui de la transmission téléphonique ordinaire par suite des conditions plus rigoureuses imposées. Pour obtenir une reproduction parfaite de la parole et de la musique, il est en effet nécessaire de transmettre sans distorsion une bande de fréquences allant de 50 à 8 000 périodes environ.

L'extension vers le bas de la bande de fréquences est relativement aisée. C'est en effet uniquement une question d'amplificateurs. On y parvient en utilisant le couplage par résistances ou par transformateurs spéciaux de grande inductance. L'extension vers le haut exige en revanche l'élévation de la fréquence de coupure des circuits. Diverses méthodes ont été proposées dans ce but. Les Allemands utilisent des quartes à charge spéciale extralégère au moyen de bobines de 11 mh normalement espacées. Leur affaiblissement est très grand, ce qui oblige à travailler à des niveaux élevés. On est donc conduit, pour éviter la diaphonie, à entourer la quarte de radiodiffusion d'une enveloppe de plomb spéciale, ce qui rend la construction assez onéreuse.

Les Américains utilisent pour la transmission de radiodiffusion des circuits normaux chargés au moyen de bobines de 22 mh dont l'espacement est moitié de celui des circuits normaux, ce qui revient à placer un petit pot de charge spécial au milieu de chaque section de pupinisation. Les niveaux de transmission sont donc les mêmes que pour la charge légère et aucune mesure spéciale n'est nécessaire

pour diminuer la diaphonie. La fréquence de coupure est deux fois plus haute, soit environ 11 000.

En France, on s'est jusqu'alors appuyé sur le fait qu'à affaiblissement égal, la fréquence de coupure des circuits fantômes est plus élevée que celle des réels. On a donc chargé les circuits fantômes à charge légère au moyen de bobines de 18 mH, ce qui leur donne une fréquence de coupure voisine de 8 000 périodes.

4. *Circuits télégraphiques.* — Sur les câbles à grande distance, les quartes réservées au télégraphe sont exploitées au télégraphe harmonique, chaque communication utilisant une fréquence différente. L'intervalle entre fréquences consécutives n'est fonction que de la rapidité de coupure des filtres. Le nombre de communications simultanées qui peuvent être échangées sur un même circuit est donc sensiblement proportionnel à la largeur de la bande de fréquences transmise. La charge légère est beaucoup plus avantageuse à ce point de vue que la charge moyenne.

III. — LES DIFFÉRENTS TYPES DE CABLES A GRANDE DISTANCE FRANÇAIS

Nous allons maintenant passer en revue les câbles à grande distance français en étudiant d'après les considérations qui précèdent les perfectionnements qui ont été réalisés.

1° *Câble Paris-Strasbourg.* — Ce câble qui fut le premier posé en France a été construit d'après la pratique américaine. Le câble comporte deux calibres de conducteurs : les circuits à gros fil (1,3 mm) servent uniquement aux communications à deux fils. A cette époque, les irrégularités de construction, en ce qui concerne en particulier les bobines Pupin, ne permettaient pas d'utiliser plus de deux amplificateurs sur le même circuit. Les plus longues communications à deux fils prévues étaient donc les Paris-Nancy (350 km). En fait, les résultats ont dépassé les prévisions et on a pu réaliser depuis sur ce câble, avec des amplificateurs améliorés, des circuits à deux fils Paris-Strasbourg comportant trois amplificateurs. Ces communications sont amplifiées tous les 150 km, c'est-à-dire dans une station sur deux.

Les circuits de petit calibre (0,9 mm) servent presque uniquement aux communications à quatre fils. Les circuits à charge légère sont amplifiés dans toutes les stations, les circuits à charge moyenne ne l'étant que dans une station sur deux.

Dans un tel système, l'importance des stations n'est pas la même, certaines servant presque uniquement aux amplificateurs des circuits à charge légère. Les bâtiments sont donc mal utilisés. De plus, les tronçons de câble ne sont pas indépendants les uns des autres, ce qui rend difficile les changements d'affectation des circuits et l'extension de l'artère.

2° *Câble Paris-Lille.* — On a cherché à supprimer les inconvénients précédents en doublant la section des conducteurs à charge légère. L'affaiblissement kilométrique de ces circuits étant alors le même que celui des circuits à charge moyenne, on a pu supprimer une station sur deux. Ceci a conduit aux câbles du type Paris-Lille sur lesquels l'espacement entre stations est de l'ordre de 130 km.

Ce grand espacement entre stations entraîne quelques difficultés pour l'entretien. De plus, cela limite les possibilités de ramification de l'artère, car il est toujours peu indiqué de brancher des câbles de dérivation en dehors des stations. La nécessité de desservir les villes intermédiaires conduit d'ailleurs sur les câbles de ce type à prévoir des points de coupure entre stations.

3° *Câble Paris-Bordeaux.* — Par suite de la proportion de plus en plus importante de circuits de grande longueur, c'est-à-dire à charge légère, on aurait été conduit à réaliser les câbles du type ci-dessus presque uniquement en conducteurs de gros calibre. Leur nombre de quarts aurait donc été très limité. L'extension rapide de la téléphonie interurbaine nécessite au contraire des artères de très grosse capacité. Pour augmenter le nombre des conducteurs, on a donc été conduit à diminuer leur section en rapprochant les stations d'amplificateurs. Ceci était également imposé par la nécessité de placer ces stations aux points de dérivation les plus importants. A ce point de vue, il y a toujours un gros intérêt à construire les stations dans les grandes villes. Ceci était particulièrement vrai sur le Paris-Bordeaux où l'emplacement des stations était pour ainsi dire imposé par la configuration géographique. Sur ce câble, on a donc remplacé les conducteurs de 1,3 mm par des conducteurs de 1,2 mm pour les deux fils et les quatre fils charge légère. En même temps, les progrès réalisés dans la construction des câbles et des bobines et les procédés de raccordement ont permis d'élever très sensiblement le point d'amorçage des amplificateurs à deux fils et par suite, d'augmenter le nombre d'amplificateurs embrochés sur un même circuit. Les communications

Paris-Bordeaux par exemple sont à deux fils et comportent quatre amplificateurs.

4° *Les câbles à un seul calibre de conducteurs.* — Nous avons vu ci-dessus que la portée des circuits à quatre fils charge moyenne était limitée par les phénomènes transitoires à 800 km environ. L'augmentation de portée des circuits à deux fils plus économiques a permis d'utiliser ces derniers jusqu'à des distances de plus de 600 km (Paris-Valence).

D'autre part, la nécessité de rapprocher les stations aurait entraîné pour les quatre fils charge moyenne soit l'emploi de fils inférieurs au 0,9 mm, ce qui n'est pas recommandable, soit l'utilisation de ces circuits à de faibles niveaux, ce qui est peu économique. On préfère actuellement supprimer les circuits à quatre fils charge moyenne en utilisant uniquement la charge légère pour toutes les portées supérieures à 600 km. Dans ces conditions, tous les conducteurs du câble sont de même calibre, les circuits étant tous amplifiés à chaque station.

Ceci simplifie beaucoup la fabrication, les équilibrages et l'affectation des circuits. Le calibre des conducteurs utilisé ne dépend que de l'espacement des stations. On a employé jusqu'à présent en France le 1,2 mm qui correspond à un espacement de 110 km entre stations et le 0,9 mm qui correspond à un espacement de 70 km environ.

Les principaux câbles en 1,2 mm sont le Lyon-Marseille (91 quartes), le Tours-Nantes et l'Angoulême-Limoges. Les câbles en 0,9 mm sont le Marseille-Nice, le Lyon-Genève et le Constantine-Oran. Parmi ces derniers, nous citerons plus spécialement le tronçon Lyon-Chambéry qui comporte 128 quartes, tandis que le Paris-Strasbourg n'en comportait que 94 et le Paris-Lyon 111. Sur ces derniers câbles les communications de moins de 350 km sont à deux fils et comportent jusqu'à quatre amplificateurs embrochés. Les circuits à quatre fils charge légère sont seuls utilisés pour les distances supérieures.

IV. — CONCLUSION

L'étude précédente montre dans leurs grandes lignes les progrès réalisés en France dans ces dernières années et dont les traits saillants sont les suivants :

1° Accroissement des facilités d'interconnexion et meilleure utili-

sation des stations par amplification des circuits dans toutes les stations.

2° Augmentation de la portée des circuits à deux fils résultant d'une meilleure fabrication, et comme conséquence, suppression des circuits à quatre fils charge moyenne.

3° Construction plus économique et augmentation de la capacité des artères par diminution du calibre des conducteurs.

L'amélioration constante des procédés de fabrication permettra certainement de réaliser d'autres progrès. On étudie actuellement en particulier la possibilité d'augmenter la qualité des circuits à deux fils en élevant leur fréquence de coupure:

L'Administration française dispose maintenant d'un réseau homogène de câbles de grande capacité qui relie Paris à Bâle, Strasbourg, Lille, Londres, Le Havre, Nantes, Toulouse et Marseille. L'interconnexion de ces artères par un réseau de câbles transversaux est en voie de réalisation. La pose des câbles Rouen-Caen, Angoulême-Limoges, Marseille-Nice, Lyon-Genève, Nancy-Longwy est en cours d'achèvement. D'ici peu, la France sera donc dotée d'un réseau de câbles à mailles serrées qui permettra l'écoulement par voie souterraine de toutes les communications interurbaines de quelque importance. Par suite de l'unité de vue qui a présidé à l'organisation de ce réseau, la France n'aura rien à envier à ce sujet aux autres Etats européens.

APPAREILS DE MESURE DANS L'INDUSTRIE RADIOLOGIQUE ⁽¹⁾

par M. PILON

Les appareils de mesure, utilisés dans les constructions radiologiques, peuvent se classer en deux catégories :

1° Les appareils normalement utilisés dans l'Industrie : voltmètres, ampèremètres haute et basse tension.

2° Les appareils sensibles utilisés pour la mesure du rayonnement.

De la première catégorie, aucune observation spéciale n'est à tirer; les problèmes actuels sont parfaitement connus et ont des solutions donnant satisfaction.

La seconde catégorie peut appeler certaines observations précisant des besoins plus ou moins satisfaits. Malheureusement, le débouché de tels appareils est relativement petit.

Pour connaître la quantité d'énergie X, on mesure, au moyen de galvanomètres très sensibles, les courants d'ionisation produits dans des dispositifs nommés « Intensionomètres » ou « Dosimètres ».

Un constructeur français a établi spécialement pour cet usage un galvanomètre à deux pivots. Cet appareil possède une échelle verticale permettant la lecture de côté. L'aiguille a un rayon de 140 mm. Chaque petite division, qui correspond à 10^{-8} A, a une longueur de 3 mm environ. La déviation totale de l'appareil est obtenue pour 0,6 à 0,9 microampère.

Ces appareils peuvent à la rigueur donner satisfaction, mais il serait souhaitable qu'ils aient une sensibilité 2 à 3 fois plus grande pour obtenir de bonnes mesures des puissances du rayonnement X actuellement employées.

La construction d'un tel galvanomètre est industriellement possible, ainsi qu'en témoigne l'établissement de quelques dizaines d'appareils déjà utilisés, mais le prix de revient de ces dispositifs est élevé et leur construction si difficile que le fabricant semble devoir y renoncer.

Il devient donc nécessaire de s'adresser aux galvanomètres à suspension unifilaire. Nous avons utilisé un tel type d'appareil, qui donne

(1) Ce rapport sera présenté et discuté au cours de la Semaine de discussions de novembre, le vendredi 28 novembre 1930.

une déviation de 1 mm sur une échelle de 103 cm pour une intensité de $1,5 \cdot 10^{-10}$ A.

On peut donc dire que ce galvanomètre est 20 fois plus sensible que l'appareil cité plus haut, si l'on attribue la même commodité, la même précision de lecture à un spot lumineux sur une échelle, qu'à une aiguille à couteau devant un cadran gradué. Mais il semble qu'un galvanomètre à miroir et à spot lumineux ne pourra jamais être proposé à la majorité de la clientèle des Médecins, qui ont besoin d'appareils excessivement simples.

Un appareil de mesure du rayonnement X, comportant un galvanomètre à suspension, semble donc réservé aux seuls praticiens de laboratoire.

Les Constructeurs d'appareils de mesure reculent devant la difficulté de construction des appareils à pivots, dont il est parlé au début de ce rapport, parce que le débouché en est peu important. Ce débouché ne peut s'élargir que si on présente à la clientèle un dispositif pratique de mesure des rayons X. Sans appareil de mesure électrique, on ne peut rien lui montrer qui corresponde à ses nécessités de travail.

TENDANCES ACTUELLES DANS LA CONSTRUCTION ET L'UTILISATION DES TRANSFORMATEURS DE MESURE ⁽¹⁾

par M. A. ILIOVICI

Après une étude générale des principales propriétés des transformateurs de courant et des transformateurs de tension, et des conditions idéales auxquelles ils devraient satisfaire, l'auteur indique un certain nombre de perfectionnements qui ont été apportés à ces appareils.

TRANSFORMATEURS DE COURANT

Dans un transformateur de courant parfait, le courant secondaire I_2 serait proportionnel au courant primaire I_1 et en phase (ou en opposition) avec lui. En d'autres termes, le *rapport de transformation* $k = I_1/I_2$ ⁽²⁾ serait constant, indépendant des conditions de fonctionnement du transformateur, et l'*angle de phase* ψ serait nul ⁽³⁾.

Dans un transformateur industriel, le rapport k n'est pas tout à fait constant ; il dépend de la nature du circuit alimenté par le secondaire, *circuit secondaire*, et du courant I_2 ; de même le déphasage ψ n'est pas nul ; sa valeur dépend des mêmes éléments que celle de k .

Nous avons montré ⁽³⁾ que l'expression du rapport de transformation peut se mettre sous la forme :

$$k = \frac{n_1}{n_2} \left[1 + \frac{\mathcal{R} l_2}{4\pi n_2^2} + \frac{\mathcal{R}^2 r_2^2}{32\pi^2 n_2^4 \omega^2} \right], \quad (1)$$

n_1 et n_2 étant le nombre de spires des enroulements primaire et secondaire, $\mathcal{R}$ la réluctance du circuit magnétique ; $r_2 = r'_2 + r''_2$, r'_2 résistance de l'enroulement secondaire, r''_2 celle du *circuit secondaire* formé par les appareils de mesure ; $l_2 = l'_2 + l''_2$, l'_2 le coefficient de self-induction de l'enroulement secondaire, l''_2 celui du *circuit secondaire*.

(1) Ce rapport sera présenté et discuté au cours de la Semaine de discussions, le vendredi 28 novembre 1930.

(2) Pour la définition des termes *rapport de transformation*, *angle de phase*, etc. Voir publication 92 de l'Union des Syndicats de l'Electricité, Ed. 1930.

(3) Voir : *Iliovici*, Transformateurs d'intensité compoundés (Bul. de la Société Française des Electriciens, 4^e Série, Tome III, n^o 22, Février 1923). — Voir aussi *Janet et Iliovici*. Sur une méthode de mesure des courants... (Bulletin de la Société Française des Electriciens, 1902).

La formule (1) montre que, pour un transformateur et un circuit secondaire donnés, le rapport k dépend de la reluctance $\mathcal{R}$, donc du courant I_2 ; d'autre part si on change le circuit secondaire, en faisant varier le nombre d'appareils alimentés, k varie aussi, à cause du changement des valeurs de r_2 et de l_2 , et aussi de $\mathcal{R}$.

On peut s'arranger, en agissant sur le nombre de spires n_1 ou n_2 , de façon que le rapport k prenne une valeur voulue k_n — *valeur nominale* — pour une certaine valeur de I_2 et pour un circuit secondaire déterminé

Dans la construction et dans l'utilisation du transformateur on s'arrangera de façon à rendre négligeable devant l'unité, les 2^e et 3^e termes de la parenthèse de la formule (1), de façon à rendre k peu variable.

Nous avons montré aussi, dans le travail cité, que le déphasage ψ d'un transformateur de courant a pour expression (1) :

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{r_1}{\left[\frac{4\pi n_2^2}{\mathcal{R}} + l_2 \right] \omega} ; \quad (2)$$

il résulte de cette formule que l'angle ψ est d'autant plus faible que le circuit secondaire est plus inductif (l_2 , donc aussi l_2 plus grands) ; par contre si on augmente la résistance du circuit secondaire (r_2 , donc aussi r_2 plus grands) l'angle ψ augmente.

L'erreur introduite par le transformateur dans la mesure d'un courant est :

$$\epsilon = \frac{k_n I_2 - I_1}{I_1} = k_n \frac{I_2}{I_1} - 1 \quad (3)$$

ou

$$\epsilon = \frac{k_n}{k} - 1. \quad (3')$$

Donc si le transformateur sert à la mesure d'un courant on n'a à se préoccuper que du rapport de transformation.

On peut exprimer ϵ en fonction de $\mathcal{R}$, l_2 , r_2 ... ; on obtient, comme nous l'avons indiqué dans le travail cité, l'expression simplifiée :

$$\epsilon = \frac{(\mathcal{R}_0 - \mathcal{R}) l_2}{4\pi n_2^2}, \quad (4)$$

(1) Pour obtenir les formules (1) et (2) on a supposé négligeable l'effet des pertes magnétiques dans le fer, ce qui est exact dans les conditions habituelles. Si ces pertes ne sont pas négligeables leur effet est plutôt utile, car elles réduisent la valeur de ψ .

ou l'expression plus exacte :

$$\varepsilon = \frac{(\mathcal{R}_0 - \mathcal{R})}{4\pi n_2^2} \left[l_2 + \frac{(\mathcal{R}_0^2 + \mathcal{R}^2) r_2^2}{8\pi n_2^2 \omega^2} \right], \quad (4')$$

$\mathcal{R}_0$, étant la reluctance du circuit magnétique correspondant à la valeur k_n de k .

L'erreur introduite par le transformateur dans la mesure d'une puissance est de la forme :

$$\gamma = \varepsilon + \operatorname{tg} \psi \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (5)$$

φ étant le déphasage entre le courant et la tension dans le circuit dont on mesure la puissance.

Pour $\varphi = 0$, γ se réduit à ε et ne dépend donc que du rapport de transformation ; par contre plus φ est grand, donc $\cos \varphi$ faible, plus le terme contenant $\operatorname{tg} \psi$ prédomine.

Il résulte de ce qui précède que l'influence de l'angle ψ sur l'erreur du transformateur est plus complexe que celle de ε et que, pour les faibles $\cos \varphi$ l'erreur provenant de ψ peut devenir de beaucoup supérieure à ε , même si le déphasage est faible ; c'est pourquoi on a cherché surtout à réduire la valeur de ψ , pour les transformateurs destinés à la mesure de la puissance ou de l'énergie.

On caractérise généralement le circuit secondaire d'un transformateur de courant par la puissance apparente, en VA, qu'il absorbe pour le courant secondaire nominal. Ainsi, par exemple, on dira que la *puissance de précision* d'un transformateur est de 15 VA, ce qui signifie que pour le courant nominal secondaire — 5 A normalement — le transformateur peut débiter 15 VA sans que ε et ψ dépassent certaines limites indiquées par les règlements. Or la puissance apparente, pour un courant I_2 est $P_{app.} = I_2 \sqrt{r_2'^2 + l_2'^2 \omega^2}$, (6) ; donc se donner la puissance de précision, revient au même que d'indiquer l'impédance du secondaire correspondante.

Mais les formules (2) et (4) ou (4') indiquent nettement que ce n'est pas l'impédance du circuit secondaire qui intervient dans le fonctionnement de celui-ci, mais séparément sa résistance r_2' qui influe sur r_2 , et sa selfinductance l_2' qui influe sur l_2 .

Ainsi on remarque que, en diminuant r_2' , donc r_2 , et en augmentant l_2' , dont l_2 , on réduit le déphasage ψ [formule (2)] et on augmente ε [formule (4) et (4')]. L'angle ψ ayant, comme on l'a vu, plus d'importance que l'erreur ε , il résulte de ce qui précède que, à impédance secondaire égale, un transformateur de courant donne une erreur d'au-

tant moindre, surtout dans la mesure d'une puissance avec faible $\cos \varphi$, que le circuit secondaire est plus inductif.

Le circuit secondaire d'un transformateur devrait donc être caractérisé soit par sa résistance r''_2 et sa réactance ($l''_2 \omega$), soit par son impédance $\sqrt{r''_2{}^2 + l''_2{}^2 \omega^2}$ et son déphasage θ donné par :

$$\tan \theta = \frac{l''_2 \omega}{r''_2}.$$

Le cas $l''_2 = 0$ étant le plus défavorable, pour une impédance donnée, qui se réduit alors à r''_2 , on indique généralement la valeur de ε et de ψ dans ces conditions, c'est-à-dire pour le circuit secondaire non inductif.

Les formules (2) et (4') montrent aussi que le fonctionnement d'un transformateur s'améliore lorsque la fréquence augmente, au moins dans les limites des fréquences industrielles pour lesquelles ces formules sont valables.

Influence du courant secondaire. Pour un circuit secondaire donné, lorsque le courant secondaire I_2 varie, l'induction dans le fer varie dans le même sens, la perméabilité varie suivant la courbe connue et la réluctance $\mathcal{R}$ dans le sens inverse de la perméabilité.

Dans les conditions normales l'induction oscille entre 0 et 500 à 1 000 G ; dans cette région la perméabilité croît avec l'induction — son maximum ayant lieu vers 4 000 à 6 000 G pour le fer au silicium employé couramment ; la réluctance diminue donc lorsque I_2 augmente.

De ces remarques et des formules (2), (4), et (5) on déduit que ε , ψ et η seront plus grandes pour I_2 faible. On vérifie effectivement que les courbes exprimant ε , ψ et η en fonction de I_2 ont des formes analogues à celles de la figure 1.

Si on augmente fortement le courant primaire du transformateur, l'erreur ε après avoir diminué va croître, lorsqu'on aura dépassé le maximum de μ ; donc, pour de fortes surintensités, le courant secondaire augmente moins vite que le courant primaire et d'autant moins vite que la surintensité est plus forte. Le rapport de transformation

$k = \frac{I_1}{I_2}$ augmente pour les fortes surintensités ; cette augmentation est d'autant plus rapide que l'impédance du circuit secondaire est plus grande, c'est-à-dire que le nombre d'appareils alimentés par le transformateur, est plus grand et que leur consommation est plus forte.

Cette particularité des transformateurs de courant présente un certain intérêt. Ainsi lors d'un court-circuit dans le circuit contenant le

primaire, les appareils alimentés par le secondaire sont parcourus par un courant relativement moins fort que s'ils étaient placés directement dans le circuit principal ; le transformateur de courant apporte donc une certaine protection pour ces appareils.

Dispositifs employés pour améliorer les transformateurs de courant.
Dans la détermination des meilleures conditions constructives pour un

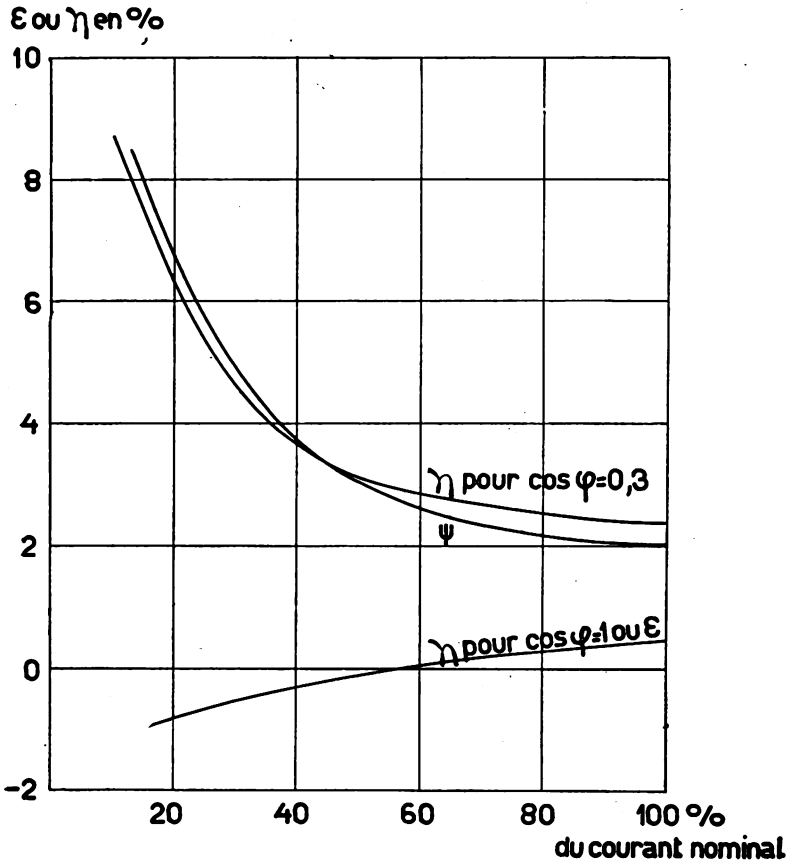


Fig. 1. — Courbes donnant les valeurs des erreurs ϵ et η et du déphasage ψ , d'un transformateur de courant, de construction habituelle.

transformateur de courant, on doit tenir compte de plusieurs éléments souvent contradictoires. Pourtant il est possible d'indiquer d'une façon générale les éléments sur lesquels il faut surtout agir et dans quel sens.

Ainsi on voit nettement des formules (2) et (4') que l'augmentation du nombre de spires — ou du nombre d'ampère-tours pour un courant donné — améliore rapidement le transformateur. On obtient aussi un

meilleur transformateur en augmentant la section du fer ou en réduisant sa longueur moyenne ; dans les deux cas on diminue la réluctance $\mathcal{R}$ du circuit magnétique. De même il convient de choisir une substance magnétique ayant une grande perméabilité aux faibles inductions [dans les transformateurs de construction courante on utilise souvent la tôle au silicium extra-supérieure ; on emploie quelquefois des tôles en alliage de fer et de nickel ⁽¹⁾].

L'augmentation du nombre de spires ou de la section du fer entraîne l'augmentation des dimensions, du poids du cuivre et du fer ; par l'adoption d'aciers spéciaux on peut obtenir des dimensions plus réduites... mais dans tous les cas le prix du transformateur augmente. D'autre part, dans certains transformateurs — transformateurs à barres, transformateurs sans primaire, bushing — le primaire ne comporte qu'une barre et on ne peut agir sur le nombre de spires.

On a donc cherché des artifices, soit pour réduire le déphasage ψ , soit pour uniformiser les courbes d'erreur en les rapprochant le plus possible d'une droite horizontale soit pour diminuer en même temps les valeurs de ϵ et de ψ .

Voilà quelques-uns de ces artifices :

a) *Transformateurs compoundés* (Cie pour la Fabrication des Compteurs). — Les dispositifs qui, à notre connaissance, résolvent le problème de la façon la plus parfaite, sont ceux utilisés par la Cie pour la Fabrication des Compteurs dans les « *Transformateurs compoundés* » ⁽²⁾. Dans ces appareils des ampère-tours auxiliaires, pratiquement constants, sont réglés de façon que la perméabilité du fer ait sa valeur maximum pour la valeur moyenne du courant I_2 . Les ampère-tours « de compoundage » sont plusieurs fois supérieurs aux ampère-tours résultant du primaire et secondaire, de sorte que, la variation du courant I_2 a une faible influence sur la perméabilité μ , donc aussi, sur la réluctance $\mathcal{R}$ et sur les valeurs de ψ , de ϵ et de η .

On obtient par l'artifice du compoundage des erreurs extrêmement faibles sans augmenter trop les dimensions du transformateur, et, même si, pour obtenir, un appareil économique, on tolère, pour le courant nominal, les erreurs admises par les règlements, ces erreurs gardent les mêmes valeurs pour les courants très faibles, tandis que

(1) Voir : Current Transformers with Nickel-Iron Cores, par Thomas Spooner, A. I. E. E. Trans., 1926, p. 701.

(2) Voir Iliovici, op. cité.

pour les autres types de transformateurs les erreurs augmentent fortement pour les faibles courants.

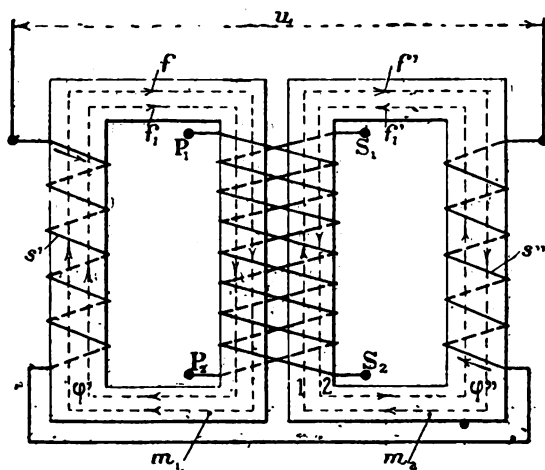


Fig. 2.

Schéma d'un transformateur compoundé :

P_1, P_2 enroulement primaire

S_1, S_2 enroulement secondaire

s_1, s_2 circuit de compoundage

$f, f_1, f', f'1$ lignes de force magnétiques.

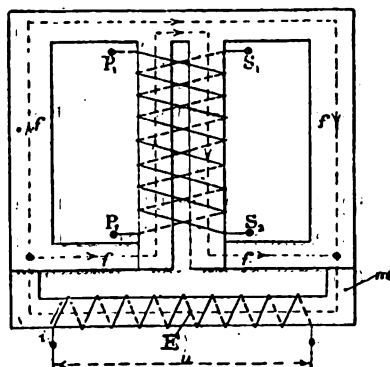


Fig. 3.

Schéma d'un transformateur compoundé, modèle 1920 : P_1, P_2 enroulement primaire ; S_1, S_2 enroulement secondaire ; m électro-aimant de compoundage ; E , circuit de compoundage ; f, f' lignes de force magnétiques.

Les fig. 2 et 3 donnent les schémas des deux types de compoundage employés habituellement. On voit que, dans les deux cas, les circuits

de compoundage, alimentés sous tension constante u , produisent un flux nul à travers les circuits principaux.

La fig. 4 donne des courbes d'erreur produites par un transformateur compoundé (à confronter avec les courbes fig. 1).

b) *Transformateur auto-compoundé* (Cie pour la Fabrication des Compteurs). — Au lieu de faire produire le courant de compoundage par une source auxiliaire à tension constante, on peut le demander au transformateur lui-même ou à un transformateur auxiliaire dont le primaire est parcouru par le même courant. Dans ce cas, les ampères-tours de compoundage varient avec le courant primaire et la courbe d'erreur n'est plus une droite horizontale.

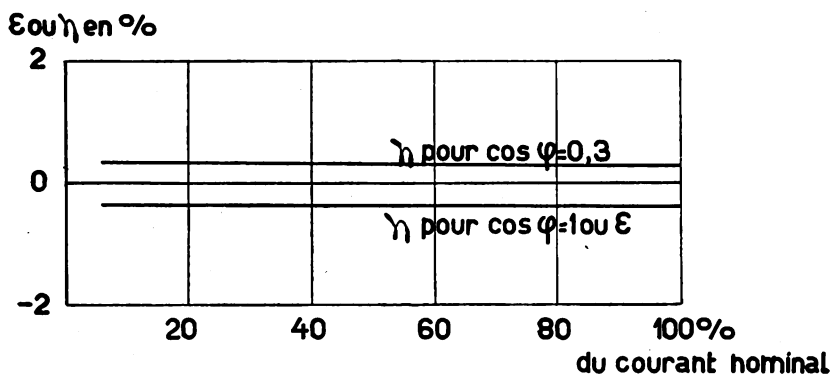


Fig. 4. — Courbes donnant les valeurs des erreurs ϵ et η du même transformateur que la fig. 1, mais « compoundé ».

Ce dispositif, moins parfait que le précédent, a l'avantage de ne pas nécessiter une source auxiliaire ; il a été breveté il y a plusieurs années par la Cie pour la Fabrication des Compteurs.

c) *Transformateur à deux étages* (Brooks et Holz) ⁽¹⁾. — Ce système, dont la fig. 5 donne un schéma, se compose, en principe, de deux transformateurs A et B, dont les primaires sont en série et les secondaires en opposition ; le transformateur B porte un deuxième secondaire indépendant ; d'autre part, les appareils alimentés par les transformateurs auront deux enroulements identiques.

(1) Voir : Two-Stage Current Transformer, par H. B. Brooks et F. C. Holtz, A. I. E. E. Trans, 1922, p. 382.

Si I_1 est le courant primaire, I_2 et I_3 les deux courants secondaires, l'appareil de mesure W fonctionne sous l'influence de la somme $(I_2 + I_3)$ et on démontre la relation :

$$I_2 + I_3 = (1 + \epsilon_2 \cdot \epsilon_3) I_1. \quad (7)$$

ϵ_2 étant l'erreur ϵ pour le courant I_2 et ϵ_3 pour I_3 . L'appareil de mesure se comporte donc comme si il était parcouru directement par le courant I_1 , avec une erreur $\epsilon = \epsilon_1 \epsilon_2$, produit des erreurs des deux trans-

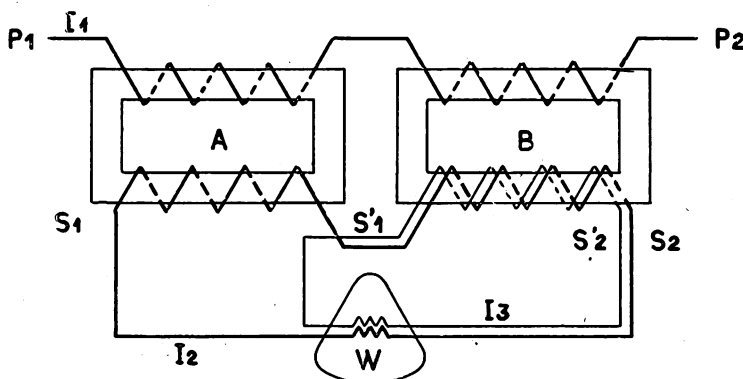


Fig. 5. — Schéma d'un système de transformateurs de courant Brooks et Hoitz, A B les deux transformateurs; W un appareil de mesure; P, P₂ les enroulements primaires; S₁ S₂, S', S'₂ les enroulements secondaires.

formateurs. Si par ex. $\epsilon_1 = 0,02$, $\epsilon_2 = 0,10$, on trouve : $\epsilon = 0,002$ ou 0,2 pour 100.

Le principal inconvénient de ce dispositif provient de la nécessité d'employer des appareils de mesure spéciaux, à deux enroulements.

d) *Transformateur compensé* (General Electric Company) (1). — Dans ce transformateur, indiqué schématiquement fig. 6, le secondaire comporte, en plus de l'enroulement principal S₁ S₂, deux enroulements s, s' formés d'un petit nombre de spires enroulés sur une partie de la section du circuit magnétique (bobines de compensation).

Le courant secondaire passant dans les spires supplémentaires produit des f.m.m. supplémentaires dans une partie de la section du fe. Ces f.m.m., variables avec I_2 , agissent sur la répartition des lignes de force magnétiques et sur la saturation du fer ; leur effet est plus

(1) M. S. Wilson : A New High-Accuracy Current Transformer (Journal of the A. I. E. E., mars 1929).

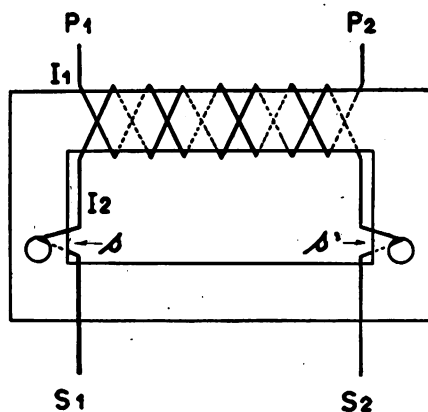


Fig. 6. — Transformateur compensé G. E. C^o
P, P₂, enroulement primaire; S, S₂, enroulement secondaire; s, s' bobines de compensation; I, I₂, Courants primaire et secondaire.

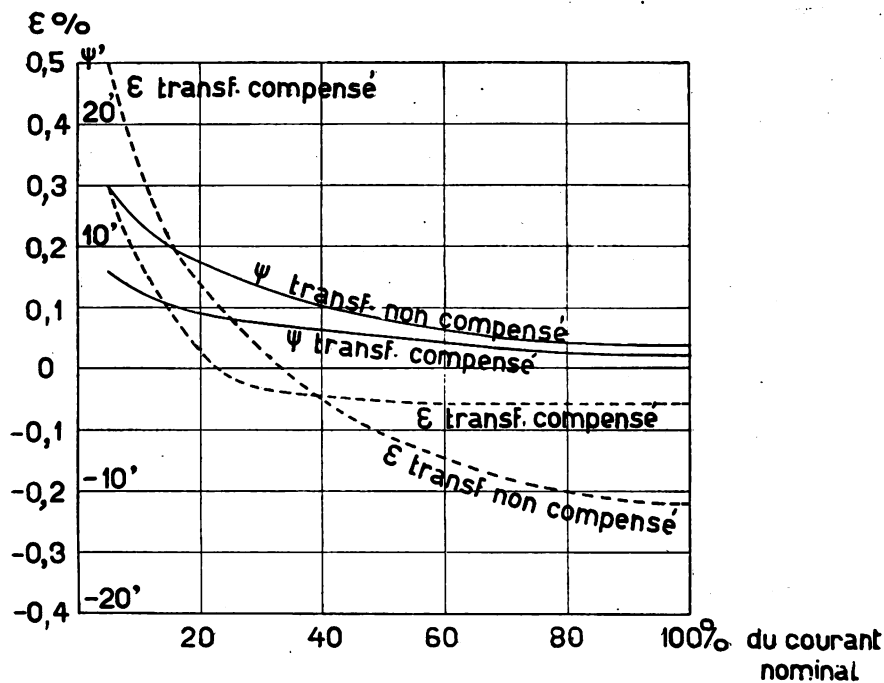


Fig. 7. — Courbes donnant les valeurs de ϵ et de ψ , pour un transformateur G. E. C^o avec ou sans compensation.

grand pour les faibles valeurs de I_2 . En réglant convenablement les sections du fer dans la partie ramifiée, le nombre de spires supplémentaires, et le sens de leur enroulement, on arrive à réduire les erreurs et à les rendre moins variables avec le courant que dans le même transformateur non compensé.

Les courbes fig. 7 permettent de se rendre compte du fonctionnement de ce type de transformateur comparativement avec un transformateur non compensé.

e) *Autres dispositifs*. — On a employé un certain nombre d'autres dispositifs dont nous citerons les suivants : 1° Spire en court-circuit (Cie pour la Fabrication des Compteurs, Cie de Construction Electrique...), ou enroulement tertiaire fermé sur une impédance réglable ; 2° Enroulement tertiaire fermé sur un condensateur, qui fournit le courant magnétisant ; l'effet est de réduire l'angle ψ et l'erreur ϵ sans améliorer la forme de la courbe d'erreur ; 3° Enroulement tertiaire alimenté par transformation auxiliaire qui fournit le courant magnétisant (2) ; 4° Division du circuit magnétique en deux parties ayant un nombre inégal de spires (2).

Transformateur de courant HT. — Dans un transformateur de courant, la différence de potentiel entre les deux extrémités d'un même enroulement est toujours très faible : l'isolement entre l'entrée et la sortie d'un même enroulement est donc facile à réaliser ; par contre, plus la tension du circuit, dans lequel est placé le primaire, est élevée, plus l'isolement entre le primaire et la masse et entre le primaire et le secondaire devient difficile. En particulier, les *lignes de fuite* à la surface des isolants doivent être d'autant plus longues que la tension est plus élevée. Dans les transformateurs à *barres* (fig. 8) ou dans les transformateurs *sans primaire* (fig. 9) on n'a qu'à prolonger le tube isolant qui entoure le primaire ; dans certains cas le circuit magnétique avec l'enroulement secondaire sont montés sur une des bornes d'un autre appareil : disjoncteur, interrupteur ; on obtient ainsi ce qu'on appelle le *transformateur borne* ou « *bushing* ». — Ces types d'appareils sont intéressants (surtout à cause de leur simplicité) lorsque le courant primaire est de l'ordre de plusieurs centaines d'am-pères, pour permettre d'obtenir une précision suffisante sans augmentation excessive de la section du fer.

(2) Voir : J. G. Welling et C. G. Mayo : « Instrument Transformers » (The Institution of Electrical Engineers, octobre 1929).

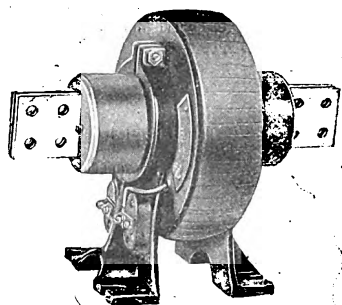


Fig. 8. — Transformateur à barre (Cie pour la Fabrication des compteurs).

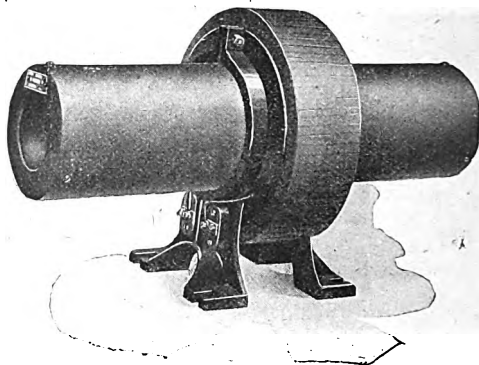


Fig. 9. — Transformateur sans primaire (Cie pour la Fabrication des compteurs).

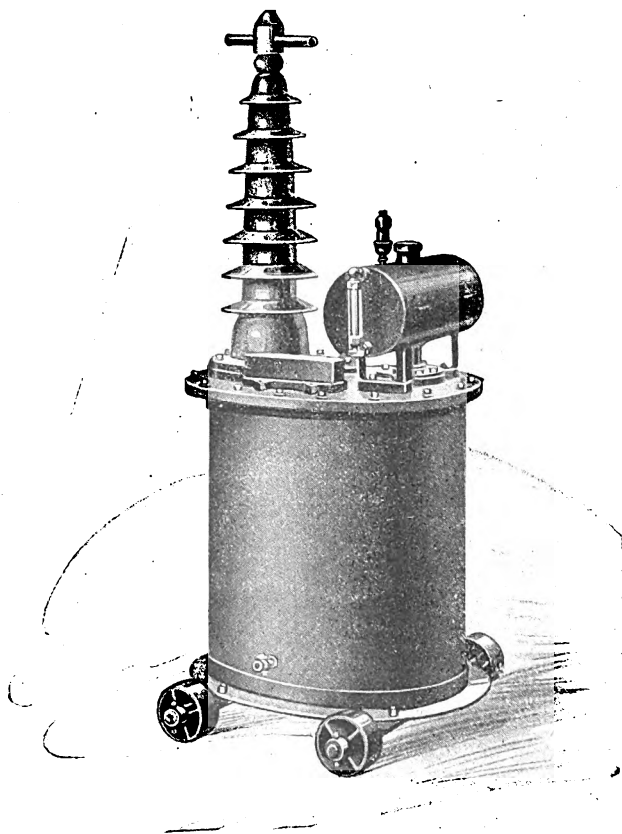


Fig 10. — Transformateur de courant dans l'huile (Cie par la Fabrication des Compteurs)

Mais le plus souvent le primaire comporte plusieurs spires et le tube isolant sur lequel il est enroulé est placé sur l'un des noyaux du circuit magnétique ; dans ce cas l'allongement du tube entraîne celui du circuit magnétique. Si on veut maintenir au transformateur une précision suffisante, on est amené à augmenter aussi la section du fer et le poids de cuivre.

Pour réduire les dimensions du transformateur et assurer mieux son isolement et son refroidissement, on le place souvent dans une

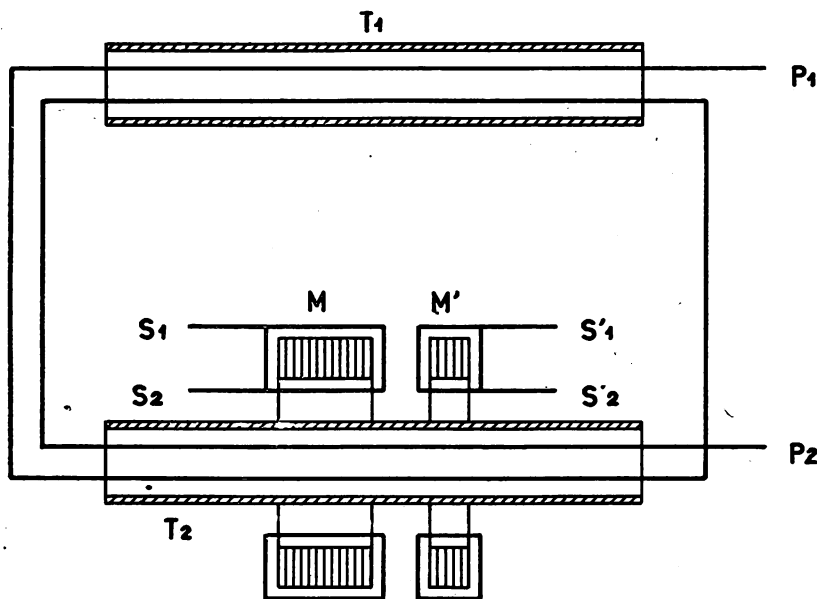


Fig. 11. — Vue schématique (Section) des parties essentielles d'un transformateur HT dans l'air à deux tubes isolants (Siemens et Halske). M' M' circuits magnétiques; S, S₂, S'₁ S'₂, enroulements secondaires. P, P₂, enroulements primaires; T₁, T₂ tubes isolants.

cuve remplie d'huile, comme pour les transformateurs de puissance (fig. 10) ; cette solution est la plus répandue pour les tensions moyennes et même pour les hautes tensions.

Pourtant plusieurs constructeurs ont cherché à réaliser des transformateurs HT dans l'air à circuit magnétique de dimensions réduites. Une première solution consiste à employer un transformateur analogue au transformateur à barre fig. 8, en lui ajoutant un deuxième tube à l'extérieur du circuit magnétique et en plaçant l'enroulement primaire à l'intérieur de ces deux tubes (Siemens et Halske, fig. 11).

Ce type de transformateur comporte souvent deux circuits magnétiques dont l'un sert à alimenter des appareils de mesure et l'autre des

relais ou des appareils demandant moins de précision que les autres. Les deux tubes peuvent être remplacés par une pièce unique, en porcelaine ou autre matière moulée, ayant la forme générale d'un tube

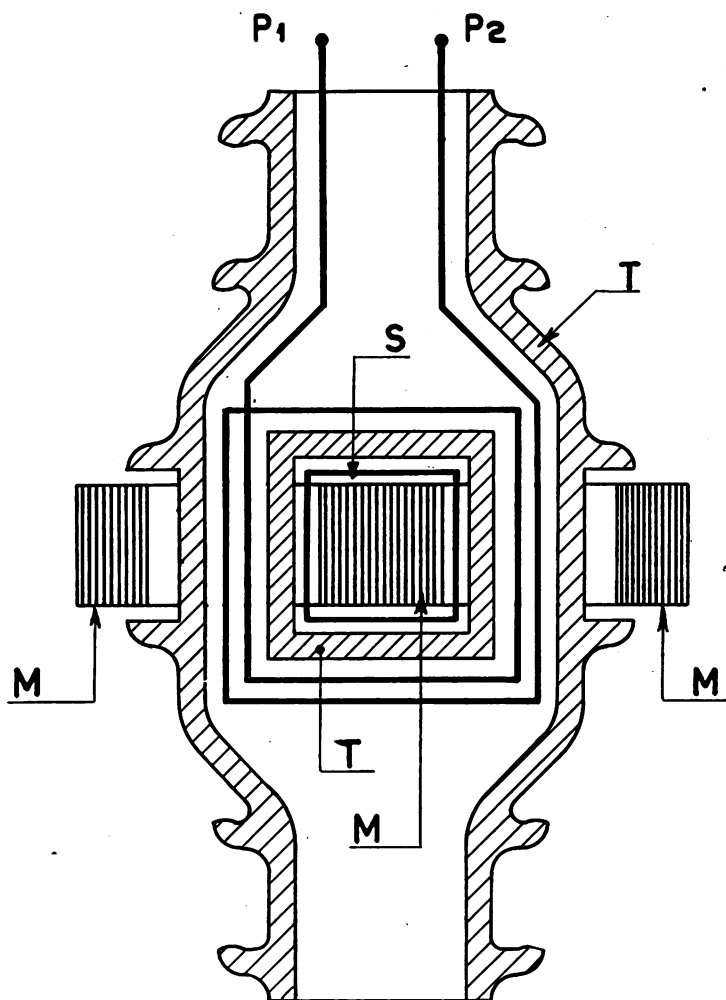


Fig. 12. — Vue schématique (Section) d'un transformateur de courant à tube double (Koch et Sterzel). — M M M circuit magnétique; T, T tube double en porcelaine; P, P₂ enroulement primaire; S enroulement secondaire.

présentant en son milieu deux dérivations, qui laissent entre elles un trou dans lequel passe l'un des noyaux du circuit magnétique portant l'enroulement secondaire. La fig. 12 représente le schéma d'un transformateur de ce type (Koch et Sterzel)

Pour les très hautes tensions on a essayé de réaliser des transformateurs « en cascade » : le secondaire d'un premier transformateur alimente le primaire d'un deuxième, dont le secondaire alimente le primaire d'un troisième et ainsi de suite ; l'ensemble est monté sous forme d'une colonne en matière isolante de façon que chaque trans-

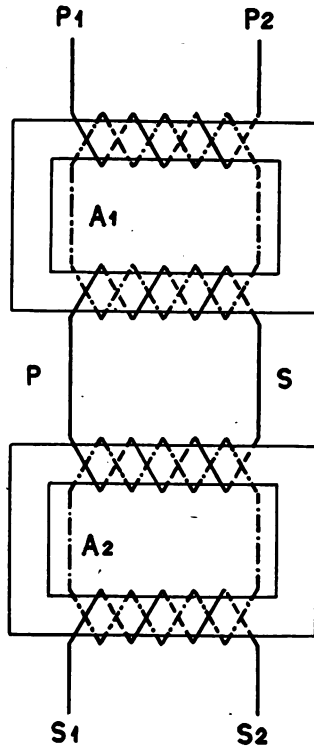


Fig. 13. — Schéma du montage d'un système de transformateurs de courant en cascade (Pfiffner) P, P₂ primaire principal; S, S₂ secondaire principal; P S enroulement intermédiaire; A₁, A₂ enroulements auxiliaires en court circuit.

formateur soit d'autant mieux isolé qu'il se trouve plus près électriquement du réseau. Dans certains modèles (Pfiffner ⁽¹⁾) des circuits tertiaires en court-circuit améliorent le fonctionnement des appareils (fig. 13).

La Compagnie pour la Fabrication des Compteurs construits sous le nom de « transformateur de courant type Φ » un transformateur à

(1) Voir : Elektrotechnisches Zeitschrift, année 1926, page 44.

air libre pour très haute tension ayant des particularités intéressantes. Le circuit magnétique principal (T_2 , tg. 14), portant l'enroulement secondaire principal S_1 S_2 qui alimente les appareils de mesure ou relais,

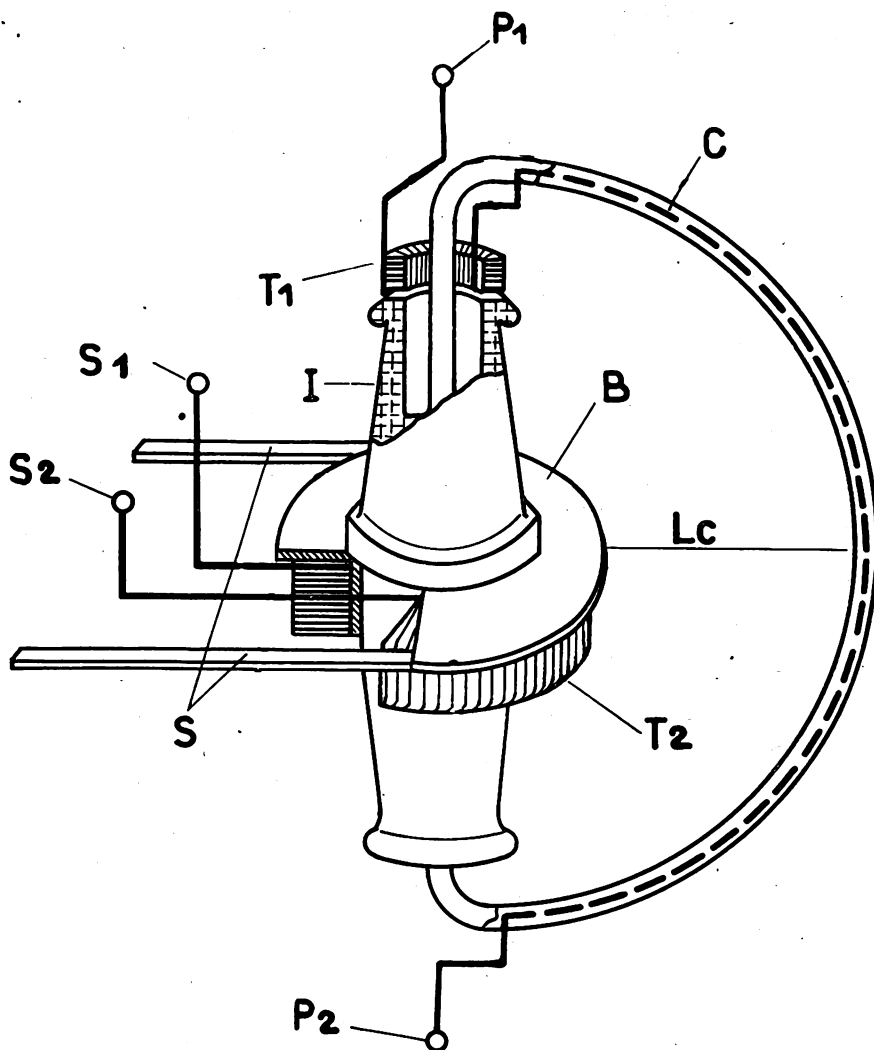


Fig. 14. — Schéma d'un transformateur type Φ (Cie pour la Fabrication des Compteurs) T_2 transformateur principal; S_1 S_2 son enroulement secondaire qui alimente les appareils de mesure; I borne traversée; S , B supports; T_1 transformateur auxiliaire dont le primaire P_1 P_2 est parcouru par le courant à mesurer; C tube en cuivre servant comme circuit intermédiaire.

est placé vers le milieu d'une borne de traversée I . Le primaire de ce transformateur est formé par un tube de cuivre C qui fait partie du secondaire (pouvant comporter 2 ou quelques spires) d'un transfor-

mateur T_1 placé à la partie supérieure de la borne et dont le primaire $P_1 P_2$ est alimenté par le courant à mesurer. Le tube C est au potentiel de la haute tension.

On obtient ainsi un transformateur simple et facile à isoler, l'isolement était assuré par la borne traversée. Voici quelques résultats montrant la précision obtenue :

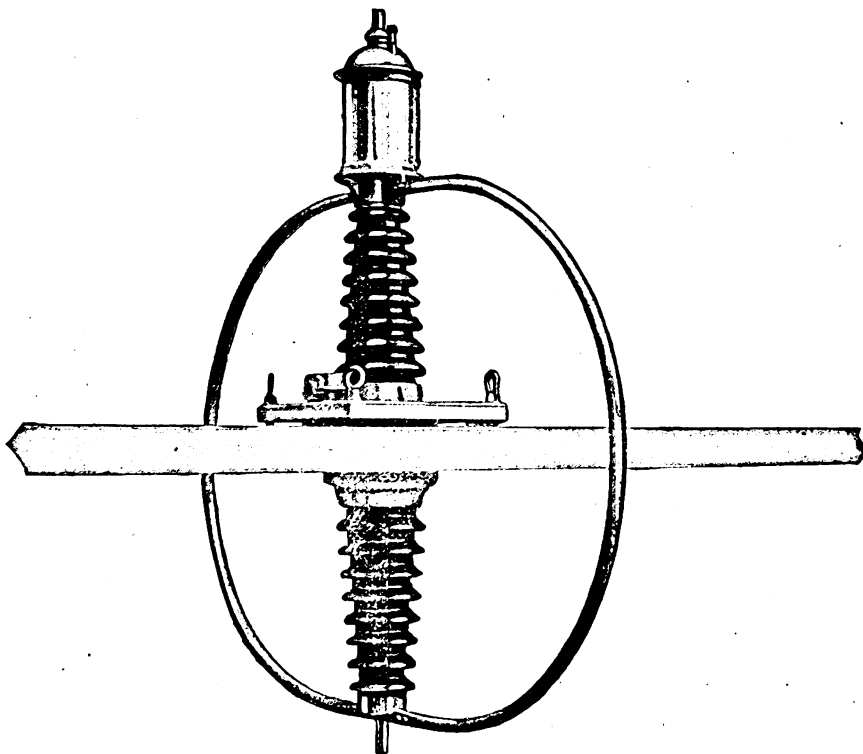


Fig. 15. — Transformateur de courant H T, type Φ
(Cie pour la Fabrication des Compteurs).

COURANT EN P. 100 DU COURANT NOMINAL	DÉPHASAGE ψ en minutes.	ERREUR ϵ en p. 100.	CONDITIONS IMPOSÉES PAR LES RÈGLEMENTS U. S. E.			
			classe A ψ classe B		classe A ϵ classe B	
20	23'	— 0,6	40'	60'	$\pm 0,5$	± 1
50	14'	0	—	—	$\pm 0,5$	± 1
100	11'	+ 0,2	20'	40'	$\pm 0,5$	± 1

Rappelons que la classe B correspond aux transformateurs industriels et la classe A aux transformateurs de précision ; la précision est supérieure à celle du transformateur de classe A.

La fig. 15 représente la vue d'un transformateur Φ .

TRANSFORMATEURS DE TENSION

Dans un transformateur de tension parfait, la tension secondaire U_2 doit être proportionnelle à la tension primaire U_1 et en phase (ou en opposition) avec elle.

Dans un transformateur industriel le rapport de transformation $k = \frac{U_1}{U_2}$ n'est pas tout à fait constant ; il dépend de la nature du circuit secondaire sur lequel débite le transformateur et, à un degré moindre, de la tension primaire. De même le *déphasage* ψ entre U_2 et U_1 , n'est pas tout à fait nul, sa valeur dépend des mêmes éléments.

Les transformateurs de tension sont analogues aux transformateurs de puissance ; ils débitent un courant faible par rapport à leur *courant d'échauffement* ⁽¹⁾. Dans leur étude on doit tenir compte des conditions de fonctionnement à vide ⁽²⁾ ; pourtant on peut négliger les constantes de marche à vide et on obtient alors, pour l'erreur ϵ dans la mesure d'une tension et pour le déphasage ψ les expressions, au signe près :

$$\epsilon = \frac{RI_2}{U_2} \cos \varphi_2 + \frac{L \omega I_2}{U_2} \sin \varphi_2 \quad (8)$$

et

$$\sin \psi = \frac{L \omega I_2}{U_2} \cos \varphi_2 - \frac{RI_2}{U_2} \sin \varphi_2, \quad (9)$$

avec $R = k^2 r_1 + r_2$, $L = k^2 l_1 + l_2$, r_1 et r_2 étant les résistances des enroulements primaire et secondaire, l_1 et l_2 leurs coefficients de self, de fuite, φ_2 le déphasage entre I_2 et U_2 ⁽³⁾.

Ces formules montrent que les grandeurs ϵ et ψ sont d'autant plus grandes que les résistances des enroulements et les fuites magnétiques

(1) Voir Publication 92 de l'U. S. E.

(2) Voir : Iliovici, Transformateurs de mesure de tension (Bulletin de la Société Française des Electriciens, avril 1917).

(3) Voir : Iliovici, Cours d'Electrotechnique, vol. III, page 235. 2^e Edition (Librairie de l'Enseignement Technique).

entre eux sont plus fortes, que le courant I_2 débité est plus grand et U_2 plus petit ; elles dépendent aussi du $\cos \varphi_2$ du circuit secondaire du transformateur.

La discussion de ces formules est simple ; il est d'ailleurs assez facile de réaliser des transformateurs de tension donnant de faibles erreurs dans les conditions de leur emploi.

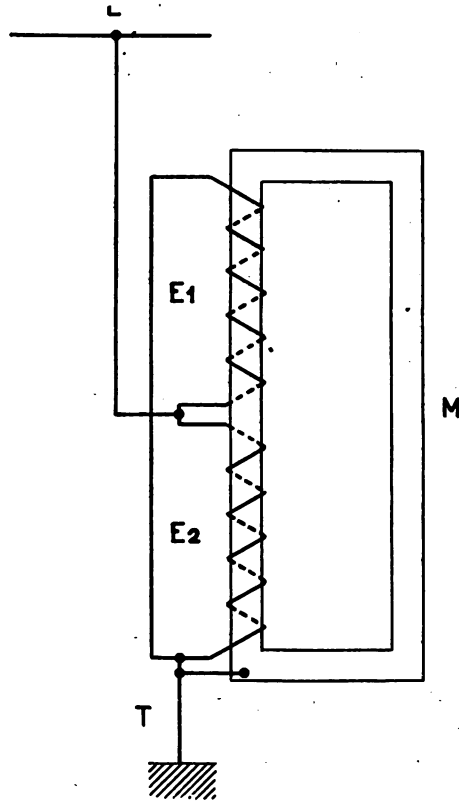


Fig. 16. — Schéma du montage d'une bobine d'écoulement (Cie pour la Fabrication des Compteurs) : L ligne ; T terre ; M circuit magnétique ; E₁, E₂ enroulements en parallèle.

Transformateurs HT. — Plus la tension primaire est élevée, plus les dimensions du transformateur, alimentant les mêmes appareils, sont grandes ; d'abord à cause de l'augmentation du nombre de spires primaires, mais surtout à cause de l'augmentation des lignes de fuite qu'on doit laisser aux extrémités des tubes isolants qui séparent l'en-

roulement HT (primaire) de la BT et de la masse. Ainsi le poids et le prix d'un transformateur augmentent très rapidement avec la tension.

Si l'une des extrémités de l'enroulement HT est à la terre, on peut, par une construction appropriée, éviter les lignes de fuites aux extrémités des tubes. Ainsi dans les *bobines d'écoulement* de la Cie des Compteurs, l'enroulement HT est formé de deux enroulements en parallèle, monté suivant le schéma de la figure 16 ; on voit facilement que les points des enroulements voisins du fer sont au potentiel de celui-ci, et qu'il est inutile de laisser des lignes de fuite.

Transformateurs en cascade. — Pour réduire le poids et le prix des dispositifs de mesure de la tension dans le cas des circuits à très haute tension on emploie un certain nombre de transformateurs dont les primaires sont montés en série, suivant le schéma théorique de la fig. 17. Si les transformateurs sont identiques et tous à circuit ouvert, la tension U_2 sera donnée par la formule : (10) $U_2 = \frac{U_1}{kN}$, N étant le nombre de transformateurs en série, U_1 la tension à mesurer, k le rapport de transformation de chaque transformateur. Mais lorsque le secondaire de l'un des transformateurs alimente des appareils de mesure, son impédance apparente diminue rapidement lorsque la charge augmente ; les tensions primaires ne se répartissent plus également entre les N transformateurs ; la tension U_2 n'est plus égale à la valeur trouvée par la formule (10) : les mesures sont faussées.

Deux dispositifs sont utilisés pour répartir uniformément les tensions en charge.

a) *Dispositif Pfiffner* (1). — Dans ce dispositif, représenté schématiquement fig. 18, on établit d'un côté des liaisons électriques a_{12} , a_{23} ,... entre les enroulements des transformateurs successifs et, d'autre part, des liaisons électro-magnétiques b_{11} , b_{22} ,... entre les deux extrémités d'un même enroulement. Les premières ont pour but de répartir la consommation des appareils de mesure entre les divers transformateurs ; les dernières ont pour rôle de réduire les fuites magnétiques entre les diverses parties d'un même enroulement.

b) *Dispositif de la Cie pour la Fabrication des Compteurs.* — Dans ce dispositif, dont la fig. 19 donne une représentation schématique,

(1) Voir : ETZ année 1926, page 44.

la consommation des appareils de mesure est répartie uniformément entre les N transformateurs principaux $T_1, T_2, T_3, T_4 \dots$ à l'aide des $(N-1)$ transformateurs auxiliaires $T_A, T_B, T_C \dots$ — Ce dispositif emploie

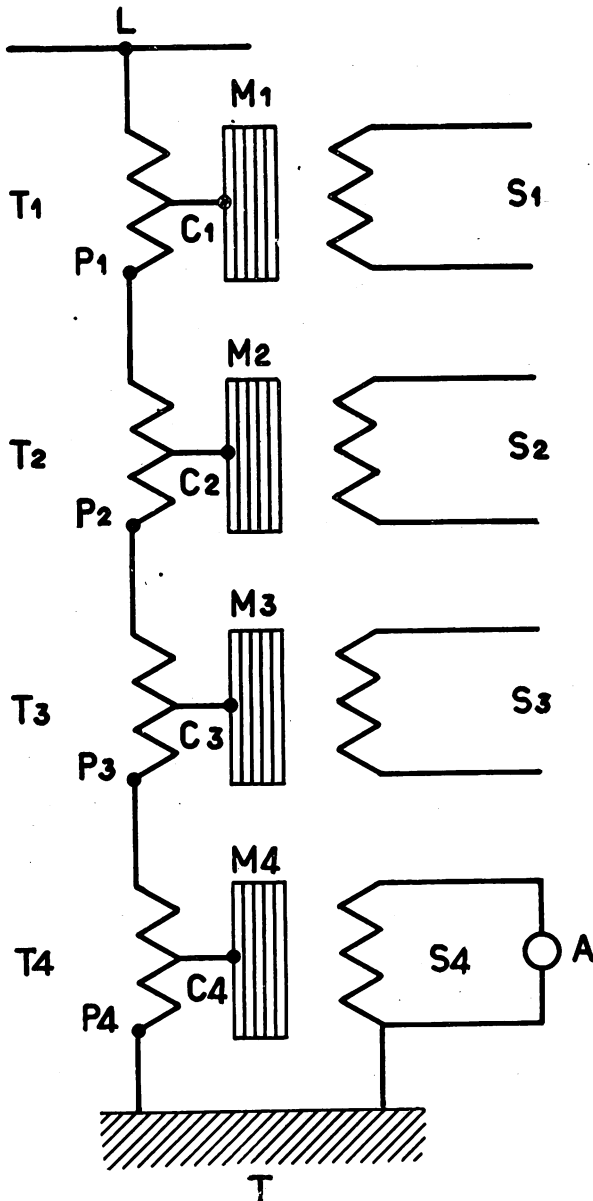


Fig. 17. — Schéma de 4 transformateurs de tension en cascade; $T_1, T_2 \dots$ transformateurs; $P_1, P_2 \dots$ primaires; $S_1, S_2 \dots$ secondaires; $M_1, M_2 \dots$, circuits magnétiques; $C_1, C_2 \dots$ liaisons électriques pour fixer les potentiels de $M_1, M_2 \dots$; A appareils de mesure.

un plus grand nombre de transformateurs que le précédent, mais il présente les principaux avantages suivants : 1° les transformateurs sont

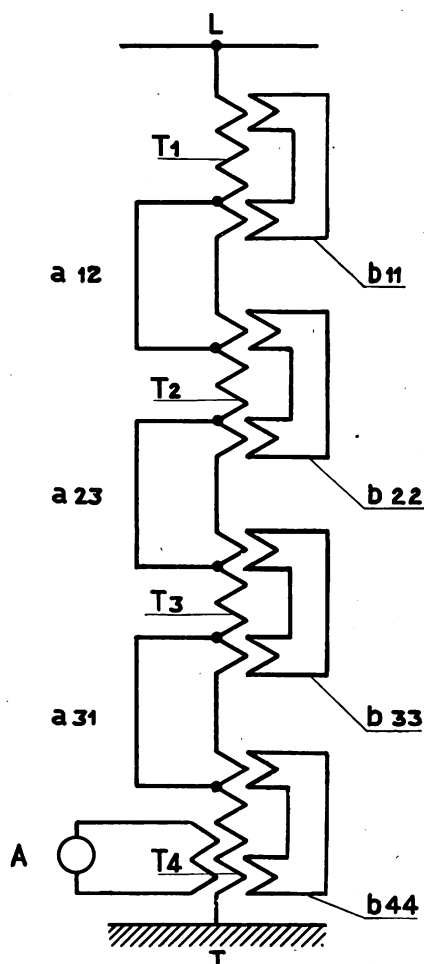


Fig. 18. — Schéma de montage d'un groupe de transformateurs en cascade (Pflifner), avec circuits de liaison et de compensation : T_1, T_2 , transformateurs ; $a_{12}, a_{23}, \dots$ liaisons électriques entre transformateurs successifs ; $b_{11}, b_{22}, \dots$ circuits de compensation des fuites magnétiques ; A appareil de mesure L ligne, T terre.

de construction normale ; 2° les N transformateurs $T_1, T_2, \dots$ sont identiques ; il en est de même des $(N-1)$ transformateurs $T_A, T_B, \dots$; 3° la compensation est plus parfaite.

La fig. 20 donne vue d'un dispositif à 4 transformateurs principaux et 3 transformateurs auxiliaires : chaque transformateur prin-

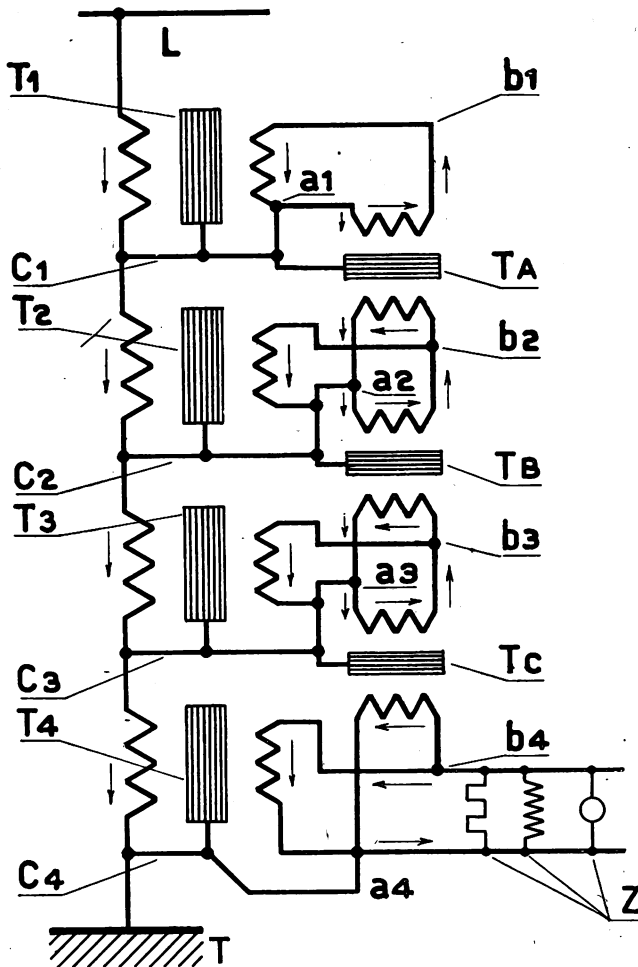


Fig. 19. — Schéma de montage d'un système de transformateurs de tension en cascade (Cie pour la Fabrication des Compteurs) $T_1, T_2, \dots$ transformateurs principaux; $T_A, T_B, \dots$ transformateurs auxiliaires; $C_1, C_2, \dots$ liaisons électriques pour fixer les potentiels des circuits magnétiques et électriques; $a_1, b_1, a_2, b_2, \dots$ circuits électriques; Z impédance alimentée par les secondaires des transformateurs T_4 et T_C (appareils de mesure, etc.).

cipal est enfermé dans la même enveloppe que le transformeur auxiliaire qu'il alimente, tandis que les divers groupes sont superposés,

de façon que le transformateur au potentiel le plus élevé soit le mieux isolé (isolements en cascade).

Remarques. — 1° Pour réduire le prix des transformateurs on a

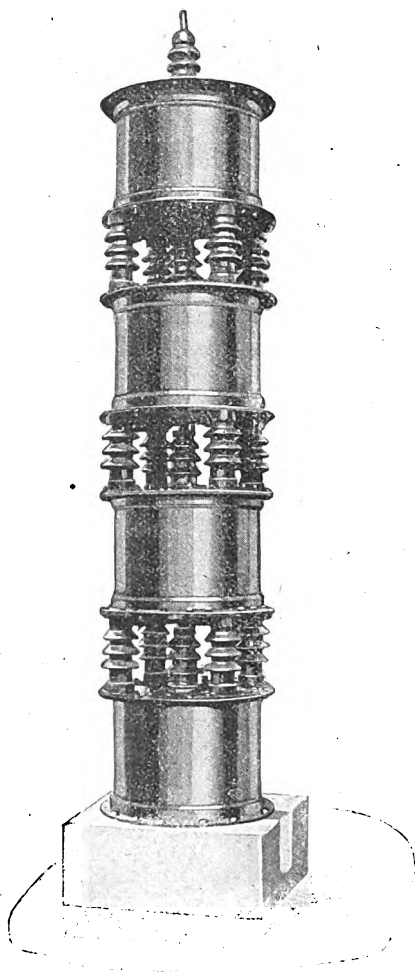


Fig. 20. — Transformateurs de tension en cascade, type Cie pour la Fabrication des Compteurs.

essayé de grouper ensemble dans une même cuve, les deux transformateurs de tension et les deux transformateurs de courant, qui servent habituellement dans un poste de comptage.

2° On a essayé aussi de remplacer les transformateurs de tension, soit par des résistances, soit par des réactances ou par des capacités en série avec le primaire d'un transformateur de courant dont le secondaire alimente les appareils de mesure.

3° On a essayé aussi d'alimenter les appareils de mesure à l'aide d'une dérivation sur une borne capacité.

Nous n'insistons pas sur ces dispositifs accessoires, qui sont peu répandus et dont certains ne paraissent pas devoir donner des résultats assez précis.

RAPPORTS ANNUELS DE LA 2^e SECTION DU COMITE SUR LES PROGRÈS RÉALISÉS DANS LA TECHNIQUE DE L'ÉCLAIRAGE

La 2^e Section du Comité poursuivant l'heureuse initiative qu'elle a prise en 1918, a demandé aux spécialistes qui s'intéressent à ses travaux de lui présenter l'état des progrès réalisés l'an dernier dans la technique de l'éclairage. Nous rappellerons d'ailleurs à nouveau qu'il ne faut pas chercher, dans ces rapports, une mise au point générale des questions traitées.

SOMMAIRE

- 1^o Revue des principaux travaux exécutés sur la photométrie en 1929-1930, par M. R. Jouaust.
 - 2^o Législation de l'éclairage, par M. Partridge p. 1220.
 - 3^o Projecteurs et phares p. 1221.
 - 4^o Lampes à incandescence, par M. Grandjean p. 1224.
 - 5^o Notes sur la construction d'enseignes auto-lumineuses à face verre cristal dit « Prisma » éclairées par transparence au moyen de lampes à incandescence, par M. Fonsèque p. 1227.
 - 6^o Luminaires et Eclairages intérieurs, par H.-J. Dougnon p. 1228.
 - 7^o Eclairage des Studios, par H. G. Cabet p. 1230.
 - 8^o Les progrès de l'optique physiologique, par le Docteur Emile Haas p. 1235.
-

REVUE DES PRINCIPAUX TRAVAUX EXÉCUTÉS SUR LA PHOTOMÉTRIE EN 1929-1930

par M. R. JOUAUST

Comparaison des étalons lumineux des Laboratoires Nationaux

Une comparaison des étalons de flux lumineux de la Physikalische Technische Reichsanstalt et du Laboratoire Central d'Electricité a été exécutée au moyen de lampes étalonnées au Laboratoire Central et transportées à Berlin.

Les résultats de cette comparaison sont les suivants :

Lampes à atmosphère gazeuse, facteur d'efficacité 15 lumens par Watt

$$\frac{\text{Lumen L. C. E.}}{\text{Lumen hefner}} = 1,123$$

Lumen hefner

Lampes à atmosphère gazeuse, facteur d'efficacité 11 lumens par Watt

$$\frac{\text{Lumen L. C. E.}}{\text{Lumen hefner}} = 1,121$$

Lumen hefner

Lampes à filament de tungstène dans le vide, filament enroulé en cage d'écureuil, facteur d'efficacité 9 lumens par Watt

$$\frac{\text{Lumen L. C. E.}}{\text{Lumen hefner}} = 1,068$$

Lumen hefner

Ces mesures comportent une remarque importante.

A la suite de comparaisons, auxquelles du reste le Laboratoire Central d'Electricité était resté étranger, l'Assemblée générale de la Commission internationale de l'Eclairage à sa session de Saranac Inn en 1928, avait décidé d'admettre les valeurs suivantes pour le rapport bougie internationale sur hefner :

1,11 pour les mesures faites sur des lampes à filament de carbone
1,15 pour les mesures faites sur des lampes à filament de tungstène dans le vide ;

1,17 pour les mesures faites sur des lampes à atmosphère gazeuse.

On voit par les résultats ci-dessus que, lorsqu'il s'agit de mesures effectuées en France, le rapport $\frac{\text{bougie internationale}}{\text{hefner}}$ est très voisin

(à 1 % près) de la valeur 1,11 qu'il devrait avoir normalement lorsqu'il s'agit de lampes à atmosphère gazeuse, et qu'au contraire une divergence de 4 % se manifeste lorsqu'on utilise des lampes à filament de tungstène dans le vide.

La cause de ces divergences n'est pas encore expliquée.

En tout cas, il convient de regretter la décision trop hâtive de Saranac Inn, contre laquelle du reste s'était élevé le représentant de la France.

Étalon primaire de brillance. — Le Bureau of Standards a réalisé un étalon primaire de brillance en utilisant le corps noir à la température de solidification du platine.

A cette température, la brillance du corps noir serait de 58,84 bougies par cm^2 .

Le Laboratoire américain a jugé les conditions de reproductibilité du dispositif utilisé suffisamment établies, pour le proposer comme étalon international de brillance au Comité Consultatif des unités électriques créé par le Comité international des Poids et Mesures.

Aucune décision n'a été prise, mais les Laboratoires Nationaux ont été invités à entreprendre des recherches dans la voie ouverte par le Bureau of Standards.

Photométrie hétérochrome. — Les Laboratoires Nationaux se sont mis d'accord sur le choix d'un mode opératoire, pour résoudre le problème de la photométrie hétérochrome, dans les conditions où il se présente le plus souvent pour eux.

Comparaison d'une des lampes à filament de carbone qui servent à conserver la bougie internationale et qui fonctionnent à 2080°K , avec une lampe à filament de tungstène fonctionnant à 2360°K .

Le mode opératoire est le suivant : placer devant le photomètre du côté de la lampe à filament de carbone un verre bleu qui modifie de telle façon la lumière de cette lampe, que l'écran du photomètre qu'elle éclaire ait la même coloration que celui éclairé par la lampe à filament de tungstène.

Le problème revient donc à déterminer une fois pour toutes le facteur de transmission du système verre bleu, lampe à filament de carbone à 2080°K .

Un certain nombre de verres circulent en ce moment dans les Laboratoires, qui déterminent ce facteur de transmission par 3 procédés.

1° Procédé direct comportant une mesure fortement hétérochrome avec le photomètre à contraste;

2° Même procédé, mais en utilisant le photomètre à scintillation ;

3° Procédé spectrophotométrique en admettant la courbe de visibilité de Gibson.

Ce n'est que lorsque ces recherches auront été terminées qu'on pourra être fixé sur la précision avec laquelle on peut déterminer le facteur de transmission et par conséquent sur la valeur du mode opératoire proposé.

Dziobek et Pirani ont proposé récemment une solution assez originale du problème de la photométrie hétérochrome.

Elle est basée sur le fait suivant : Si dans le triangle de Maxwell, on porte les points figuratifs du corps noir, du moins pour des températures correspondant aux températures de coloration des lampes usuelles, on constate que ces points sont en ligne droite et la droite prolongée coupe la ligne des radiations pures pour la longueur d'onde de 480 m μ .

On peut donc ramener à la même couleur deux corps noirs de température différente en superposant au flux lumineux de l'un d'entre eux une certaine quantité de lumière correspondant à cette radiation 480 m μ .

La comparaison photométrique sera dans ces conditions ramenée à une comparaison homochrome.

D'autre part, la proportion de flux lumineux correspondant à la radiation 480 m μ qu'il a fallu superposer au flux de l'une des lampes, pour les amener à la même coloration et qui doit être retranchée une fois la mesure faite, est faible. Son action sur l'œil est également faible.

Une erreur grossière dans l'appréciation de ce flux lumineux est donc admissible.

La méthode a été appliquée par Suzuki, de l'Electrotechnical Laboratory de Tokyo, et semble avoir conduit à de bons résultats.

Emploi des cellules photoélectriques en Photométrie

Les cellules photoélectriques dont l'usage était tout d'abord resté confiné dans les Laboratoires industriels, se sont introduites dans les Laboratoires de haute précision au moins pour des buts spéciaux (détermination de la température de coloration, mesures spectrophotométriques).

C'est ainsi que pour la détermination du facteur de transmission des verres bleus, dont nous avons parlé plus haut, les Laboratoires d'Angleterre, des Etats-Unis et de France ont employé des cellules en même temps qu'ils effectuaient des mesures visuelles.

Nous signalerons en particulier qu'au Laboratoire Central d'Electricité, les mesures pour toutes les longueurs d'onde inférieures à 500 m μ ont été faites au moyen du dispositif de cellule photoélectrique que Tardy a adjoint au spectrophotomètre d'Ivin.

Ce qui jusqu'ici limitait l'emploi des cellules, c'est qu'elles ne répondaient guère qu'aux très courtes longueurs d'onde, précisément celles pour lesquelles l'œil est peu sensible.

Mais les progrès réalisés dans la construction des cellules ont permis d'étendre leur sensibilité vers les grandes longueurs d'onde. On a même réalisé des cellules sensibles dans l'infra-rouge.

L'emploi des cellules est certainement destiné, d'ici quelques années à modifier les méthodes de la photométrie.

Signalons en passant qu'Hovioko, de l'Electrotechnical Laboratory de Tokyo, en combinant la cellule avec un enregistreur photographique a réalisé un dispositif permettant d'avoir le tracé continu de la courbe de répartition d'une lampe et de mettre ainsi en évidence certaines particularités, qui échappaient au tracé, point par point.

Lampe « lumière du jour ». — Les photographes réclament depuis longtemps un étalon d'intensité lumineuse dont la répartition soit celle de la lumière du jour.

Davis et Gibson avaient proposé d'arriver à ce résultat en plaçant devant des lampes à filament de tungstène à la température de 2360° K, 2 cuves d'un centimètre d'épaisseur, la première contenant :

$\text{SO}^4\text{Cu}\%5\text{H}^2\text{O}$	3,707 g
Mannite $\text{C}^6\text{H}^8(\text{OH})^6$	3,707 g
Pyridine $\text{C}^5\text{H}^3\text{N}$	30 cm^3
Eau distillée	1000 cm^3

la deuxième :

SO^4Co	26,827 g
$\text{SO}^4\text{Cu}\%5\text{H}^2\text{O}$	27,180 g
SO^4H^2 ($d=1,835$)	10 cm^3
Eau	1000 cm^3

Guild a proposé des solutions à peu près identiques, mais dans lesquelles il utilise de l'ammoniaque au lieu de pyridine.

On a fait à ce genre de solution la critique que le verre des cuves pouvait être attaqué à la longue par l'ammoniaque. Jusqu'ici aucune décision n'a été prise au sujet de l'emploi de l'un ou l'autre procédé.

LÉGISLATION DE L'ÉCLAIRAGE

1929

par M. H. PARTRIDGE,

Ingénieur en chef du service de l'Eclairage de la Ville de Paris.

Au cours de l'année 1929 des modifications ont été apportées par un décret du 5 octobre 1929 et un arrêté du Ministre des Travaux publics du 8 octobre 1929 au « Code de la Route », notamment en ce qui concerne l'éclairage des véhicules, et à l'arrêté du 28 juillet 1923 relatif à l'éclairage des véhicules automobiles.

Désormais, tout véhicule marchant lentement ou stationnant sur une voie publique doit être muni, après la tombée du jour, d'un ou de deux feux blancs à l'avant et d'un feu rouge à l'arrière.

L'obligation d'être pourvus de lanternes distinctes à l'avant et à l'arrière s'applique aux voitures hippomobiles, aux motocyclettes, aux bicyclettes. Pour ces dernières, on tolérera jusqu'à nouvel ordre que le feu rouge arrière soit remplacé par une surface réfléchissante rouge ou orange ; le dispositif jusqu'ici facultatif devient donc obligatoire à défaut de lanterne spéciale arrière.

Il n'est pas apporté de modifications aux règles antérieures concernant : la tolérance d'un feu unique pour les voitures à bras, d'un falot porté à la main pour les véhicules agricoles se rendant des champs à la ferme et les feux de stationnement des automobiles dont l'usage reste autorisé.

Les conditions spéciales d'éclairage imposées aux automobiles sont généralisées et précisées par le nouveau texte.

A l'avenir, indépendamment des feux de position ci-dessus définis, *tous les véhicules automobiles sans exception* devront être pourvus de dispositifs d'éclairage permettant :

1° d'éclairer la route à 100 mètres ;

2° de supprimer l'éblouissement sans cesser d'éclairer, à la rencontre des autres usagers de la route. L'utilisation de ce dernier mode d'éclairage est formellement autorisé dans les agglomérations urbaines.

Les types d'appareils répondant à ces prescriptions seront reçus après avis d'une commission spéciale et livrés par les constructeurs avec une estampille de conformité.

Tous les véhicules automobiles devront ainsi désormais être munis d'appareils estampillés. L'usage des appareils non estampillés sera interdit.

PROJECTEURS ET PHARES

*Projecteurs militaires; projecteurs pour automobiles; projecteurs pour l'éclairage;
projecteurs pour studios Phares maritimes et aériens.*

PROJECTEURS

Projecteurs militaires. — Les recherches ont continué dans le but d'arriver à des régulateurs moins compliqués et, par suite, moins fragiles; on note une tendance à abandonner le thermostat relais excité par l'image chaude du cratère et agissant sur l'avance du charbon positif pour maintenir le cratère en position correcte; on donne au crayon positif une vitesse très près de celle qui maintiendrait toujours le cratère en position; de temps en temps, un aide corrige cette vitesse et joue le rôle primitivement confié au thermostat. Les crayons négatifs non cuivrés se répandent et lors du pointage au voisinage du zénith, les miroirs en verre n'ont plus à redouter la chute des gouttelettes de cuivre fondu qui leur étaient si nuisibles.

Projecteurs d'automobile. — MM. Waguet et Dourgnon continuent la série de leurs travaux relatifs à ces appareils. L'on peut noter une tendance à l'augmentation de la taille des appareils destinés aux voitures de grande série.

Une modification du Code de la Route impose aux constructeurs l'obligation de ne plus livrer, à partir du 1^{er} mai 1930, que des voitures munies de dispositifs Code homologués par le Ministère des Travaux publics. Jusqu'ici l'automobiliste pouvait, lors des croisements rouler, à vitesse réduite, en éclairant simplement avec les lampes satellites et beaucoup d'accidents ont été occasionnés parce que le conducteur diminuait son éclairage et gardait son allure rapide. Les lampes satellites ne donnant aucun éclairage réel de la route dans la partie où l'automobiliste la regarde, il y a un très grand progrès dans l'adoption des phares Code donnant un éclairage d'au moins deux lux à vingt-cinq mètres et presque tous capables d'éclairer suffisamment de trente à quarante mètres en avant de la voiture. La majeure partie des fabricants ayant établi des appareils utilisant des lampes à deux filaments et coupelle, il a été nécessaire d'étudier la normalisation d'une lampe de ce système que le public pourrait utiliser dans tous les phares quel qu'en soit le constructeur.

Phares d'éclairage. — Leur emploi pour les illuminations et la publicité continue à se développer rapidement.

Leur emploi pour l'éclairage des plateaux de triage des grandes gares de chemin de fer s'accroît chaque jour ainsi que leur application à l'éclairage de la voie publique ; à noter à Saint-Denis l'emploi d'un mât en béton armé placé au carrefour de Picardie et supportant plusieurs projecteurs du modèle établi par la Compagnie des Lampes pour les gares de triage.

A signaler l'étude de M. Massing publiée en juin par le bulletin de la S.F.E.

Projecteurs de Studios. — La lutte entre l'arc et l'incandescence aurait pu se terminer par le triomphe complet de l'incandescence qui avait paru d'abord seule convenir aux films sonores. Les propriétaires des studios ont voulu éviter la mise au rebut de tous les projecteurs à arc et leurs efforts ont abouti grâce à quelques précautions parmi lesquelles l'éloignement des arcs et des microphones, et la mise en série avec l'arc d'une très grosse bobine de self.

PHARES

Phares maritimes. — Les ingénieurs en chef des Services des Phares d'un grand nombre de pays réunis à Londres ont nommé une commission qui doit rechercher une méthode qui servira dans tous les pays à l'évaluation de la puissance des appareils. Il importe beaucoup pour le navigateur de savoir à quelle distance il peut apercevoir les phares qu'il rencontre sur sa route et, jusqu'ici, les renseignements qui lui ont été fournis sont loin d'avoir la précision désirable. Les puissances en bougies sont celles que le constructeur a indiquées ; il n'est tenu aucun compte de la durée des éclats ; quant aux portées, elles sont calculées en partant d'un temps moyen qui, dans bien des cas particuliers, est d'une extrême rareté.

Les travaux de MM. Blondel et Rey qui ont été vérifiés par M. Van Braam Van Vloten, ingénieur en chef des Phares Néerlandais, serviront de base à la nouvelle méthode.

Phares d'Aviation. — Leur nombre augmente assez rapidement et il est difficile de dire quel système l'emportera, à noter cependant que les tubes au néon dont la lumière très caractéristique avait fait beaucoup espérer ne se sont pas montrés plus économiques que les autres appareils électriques.

Bien souvent on n'allume les phares qu'aux heures où on les suppose utiles; la dépense de fonctionnement est petite vis-à-vis des dépenses d'installation; les progrès rapides de l'éclairage occasionnent le remplacement de plus en plus fréquent des appareils, ils forcent à prévoir des amortissements plus rapides. L'on n'hésite plus à installer un appareil qui dépense beaucoup d'énergie pendant les quelques heures où il est allumé pourvu que son prix d'achat soit moins élevé que celui de l'appareil étudié et construit, comme c'était l'habitude jusqu'ici, en vue d'obtenir le maximum d'effet utile avec le minimum de dépense d'énergie. Le développement de la navigation aérienne fera croître le nombre des heures d'allumage, mais peut-on prévoir que cela modifiera la tendance actuelle vers l'appareil avantageux comme prix d'achat.

LAMPES A INCANDESCENCE

par M. H. GRANDJEAN,

Ingenieur à la Compagnie des Lampes.

Lampes d'éclairage général — Lampes d'automobiles. — Lampes spéciales pour studios.

A. — Lampes d'éclairage général

Bien que, dans le domaine de l'industrie des lampes à incandescence, aucune nouveauté sensationnelle n'ait marqué l'année 1929, il y a lieu, cependant, de signaler que de nouveaux progrès réalisés dans la technique de la fabrication ont permis d'améliorer d'une façon sensible la qualité intrinsèque des lampes.

La rationalisation et le développement de la fabrication en grande série, qui en est la conséquence, se poursuivent avec régularité dans cette branche de l'industrie et doivent, logiquement, entraîner, par la suite, de nouvelles améliorations.

D'autre part, l'éducation des consommateurs, au point de vue utilisation des lampes, a fait des progrès appréciables. Les cahiers des charges établis par l'Union des Syndicats de l'Electricité (fascicules 84 et 169) sont maintenant bien connus des principaux usagers ; l'ancienne désignation des lampes en bougies et l'indication illogique de plusieurs tensions d'utilisation (par exemple 110/115 V) sont à peu près abandonnées et remplacées désormais par la désignation en watts et l'indication d'une tension unique. Les consommateurs se rendent compte, de plus en plus, du danger que présentent, pour eux, les sources éblouissantes et accueillent avec une faveur croissante la lampe Série Standard dépolie intérieurement. Actuellement, les grandes administrations et les principales sociétés industrielles s'orientent vers l'adoption de cette lampe.

B. — Lampes d'automobiles

En ce qui concerne les lampes d'automobiles, une évolution très nette s'est produite, pendant l'année 1929, par suite de l'imminente mise en vigueur d'une réglementation plus rigoureuse de l'éclairage des voitures. Ces modifications au code de la route ont été la conséquence de l'augmentation considérable du nombre des véhicules en circulation.

Le problème de l'éclairage non éblouissant a suscité de nombreuses recherches et a été résolu de diverses façons. La plupart des dispositifs actuels sont basés sur l'emploi de la lampe à 2 filaments avec coupelle intérieure qui remplace, de plus en plus, la lampe à 1 filament.

La construction de telles lampes nécessite la mise en œuvre de procédés de fabrication très précis ; les méthodes qui avaient permis la réalisation des lampes « interchangeables » ont pu leur être appliquées avec fruit après avoir été l'objet, toutefois, de certaines modifications et perfectionnements.

A la suite de la normalisation établie par la Chambre Syndicale Patronale des Fabricants d'accessoires et de pièces détachées d'automobiles, de cycles et d'appareils aériens (normes B.N.A. 32, 60 et 61), le culot baïonnette à 3 ergots de 21,5 mm de diamètre, à 1 ou 2 plots, est pratiquement le seul utilisé.

C. — Lampes spéciales pour studios

On a assisté, en ce qui concerne l'éclairage des studios, au développement de l'évolution amorcée les années précédentes, développement encore accéléré par la transformation de la plupart des studios existants en vue de la prise des films parlants. L'utilisation toujours croissante des lampes à incandescence à haut rendement est la conséquence des nombreux avantages qu'elles présentent par rapport aux lampes à arc, et dont les principaux sont les suivants :

1° Cas du film panchromatique :

- a) réglage des appareils simplifié et définitif une fois effectué ;
- b) fixité de la lumière en position et en intensité ;
- c) propreté (ni vapeur, ni poussière), par suite entretien réduit au minimum ;
- d) économie.

2° Cas du film parlant :

Aux avantages énumérés ci-dessus, il y a lieu d'ajouter le suivant :

Silence absolu des lampes à incandescence pendant leur fonctionnement (il est nécessaire, dans ce cas, que l'enregistrement sonore ne

soit pas gêné par des bruits parasites, tels que ceux provenant de l'utilisation des lampes à arc).

Cette évolution s'est traduite, non seulement par l'augmentation du nombre de foyers équipés avec des lampes à incandescence, mais aussi par l'accroissement de leur puissance individuelle, tant pour l'éclairage d'ambiance, produit par des lampes à atmosphère gazeuse de types courants, que pour l'éclairage destiné à donner le modelé, qui met en œuvre des lampes type projection de grande puissance.

NOTES SUR LA CONSTRUCTION D'ENSEIGNES AUTO-LUMINEUSES A FACE VERRE SPÉCIAL DIT « PRISMA », ÉCLAIRÉES PAR TRANSPARENCE AU MOYEN DE LAMPES A INCANDESCENCE

par M. J. FONSEQUE

Les enseignes auto-lumineuses à éclairage solaire par réflexion sont bien connues.

Leur application à la publicité sur les voitures de livraison les a vulgarisées. L'inconvénient de ce type d'enseigne réside dans le fait que pour obtenir le résultat cherché on est conduit à lui donner une forme disgracieuse. De plus les différents dispositifs conduisent à des enseignes très volumineuses.

Une Société Anglaise a fait breveter et fabriquer un verre spécial à profil très étudié, qui permet d'obtenir l'effet d'éblouissement indiqué ci-dessus, directement sans être obligé d'incliner la face des enseignes ou d'utiliser des miroirs accessoires.

Le verre ondulé est simplement étamé. Si on utilise pour l'étamage de ce verre le procédé de « demi-tain » ou « indiscret », ce verre devient transparent et laisse passer les rayons lumineux. On peut donc construire une enseigne lumineuse à face en glace peinte en utilisant le verre décrit ci-dessus après étamage demi-tain. De jour, les inscriptions figurant sur l'enseigne présentent une luminosité remarquable, et la nuit, grâce à l'éclairage des lampes placées à l'intérieur du coffre on obtient ces mêmes inscriptions lumineuses par transparence, sur fond opaque.

Ce nouveau type d'enseigne est un perfectionnement notable dans la technique des enseignes lumineuses éclairées par transparence. Des enseignes lumineuses ordinaires peuvent être facilement transformées en enseignes du type décrit, par l'apposition derrière la glace existante d'un second verre prismatique étamé.

LUMINAIRES ET ÉCLAIRAGES INTÉRIEURS

par M. J. DOURGNON

Le système d'éclairage à adopter, ne dépend pas seulement des caractéristiques du local ou de sa destination, il dépend aussi de l'éclairage moyen admis. Alors qu'un éclairage semi-direct pourra convenir avec un faible éclairement (inférieur à 25 lux par exemple) il peut devenir tout à fait désastreux avec un fort éclairement (supérieur à 50 lux par exemple). C'est ce qui explique pourquoi la tendance actuelle, qui consiste en l'augmentation progressive des éclairages, a pour corollaire l'emploi de plus en plus généralisé d'éclairages utilisant surtout la réflexion diffuse du plafond (éclairage semi-indirect ou totalement indirect).

C'est toujours dans l'éclairage décoratif et architectural que l'on constate l'évolution la plus rapide. Nous avons indiqué l'année dernière l'évolution du luminaire, celui-ci tend de plus en plus à devenir un ensemble d'éléments optiques destinés au contrôle de la lumière.

Suivant une telle conception, le luminaire est établi suivant un principe déterminé pour une fonction bien déterminée.

Quelques exemples d'appareils actuellement en cours d'étude, vont nous permettre de préciser notre pensée.

Nous venons de signaler le grand développement que prenait l'éclairage semi-indirect. Une des applications les plus heureuses de ce système d'éclairage dans les habitations consiste dans l'emploi des « adapteurs » protégés par un abat-jour, mais la forme classique de cet abat-jour n'a plus de raison d'être avec l'éclairage électrique ; d'où des recherches nouvelles, qui ont conduit à des « habillages » dont l'aspect ne rappelle en rien celui des abat-jour. Pour être économique, un éclairage indirect doit se réaliser au moyen d'un petit nombre de sources localisées de faible puissance ; en outre, on cherche généralement à éviter les appareils suspendus au plafond d'aspect disgracieux, d'où un emploi de réflecteurs dissymétriques spéciaux que l'on fixe sur le mur à une hauteur convenable. Ce réflecteur peut, soit être masqué par un dispositif qui le transforme en une sorte d'applique, soit être laissé entièrement visible.

L'éclairage indirect habituel fournit une lumière venant d'en haut. L'effet obtenu est celui réalisé pendant le jour dans une pièce sans

fenêtre munie d'une verrière horizontale. Sa douceur est certaine, mais elle entraîne rapidement la monotonie. On a essayé d'obtenir un éclairage plus vivant tout en conservant les avantages de l'éclairage indirect. Pour cela, on peut s'arranger pour que la lumière réfléchie par une grande surface blanche n'atteigne directement les personnes et les objets que sur une seule face.

Cette surface réfléchissante peut être soit une portion localisée du plafond, soit une surface rapportée, par exemple au-dessus des fenêtres, soit un mur ou une portion de mur (par exemple, l'espace compris entre les fenêtres).

ÉCLAIRAGE DES STUDIOS

par M. G. CABET,

Ingénieur Conseil

Le fait saillant de l'année 1929 a été l'adaptation ou la création des studios de prises de vues cinématographiques pour l'enregistrement simultané des sons.

En dehors des studios Gaumont, où recherches et enregistrements sont poursuivis depuis de nombreuses années, tous les grands studios se sont transformés pour permettre la production des films parlants ou sonores dans les diverses formules qui, actuellement, s'affrontent.

Ce fait nouveau ne tolérant pas de résultats médiocres et étant toujours en relations avec de nombreux phénomènes électriques qui, d'ailleurs, n'entrent pas dans le cadre de cet exposé, les solutions empiriques qui furent usitées presque généralement tendent à disparaître avec l'entrée en fonctions de divers électriciens et techniciens qualifiés.

La première condition impérieusement exigée et sans laquelle tout travail est impossible est « le silence absolu » tant au point de vue auditif qu'au point de vue vibrations électromagnétiques de fréquence audible.

Pour ces raisons, l'éclairage par lampes à incandescence est presque exclusivement employé en remplacement des tubes à vapeur de mercure, exclus en raison de leur lumière non panchromatique.

Cependant, la Direction d'un studio sonore, désireuse d'amortir le prix d'achat d'un semblable matériel, lui a adjoint des lampes à incandescence ordinaires. Nous avons déjà dit, ici, ce qu'il y a lieu de penser d'un semblable mélange de sources de lumière hétérogène et de consommation électrique élevée.

Pour l'éclairage d'ambiance, les arcs ont aussi été abandonnés ; ils subsistent encore, parfois, en plafonniers surtout, dans les décors de hautes dimensions.

Cependant, les projecteurs à arc conservent une certaine vogue, en raison de la puissance des « effets » que, à peu près seuls, ils permettent d'obtenir par leur emploi en combinaison avec des miroirs optiques.

Mais alors, on a recours à des « filtres » insérés dans le circuit d'alimentation et destinés à étouffer les vibrations électriques provenant des commutatrices

Toutefois, ces « filtres » de provenance étrangère sont assez coûteux et encombrants et ne sont efficaces que pour un ordre d'intensité et de fréquence déterminé.

Malgré ces artifices d'ordre électrique, le silence relatif n'est obtenu qu'avec des charbons de qualité parfaite et employés à environ la demi-intensité de courant que les mêmes charbons eussent admis, condition de silence mise à part.

Il est bien certain qu'ainsi sous-intensifié, l'ensemble du projecteur a un beaucoup plus faible rendement.

Dans bien des cas, on est conduit à employer un grand nombre de petits projecteurs de 80 A que l'on éloigne relativement des microphones et qui concourent de loin à l'éclairage d'ambiance.

A peu près seuls, les charbons à lumière blanche réalisent les conditions de silence et de fixité imposées.

Cela est fort regrettable, car une telle lumière se mélange mal à celle des lampes à incandescence.

Dans bien des cas, l'emploi des projecteurs à arc est indispensable à l'obtention d'un effet de contraste accentué qui, en l'état actuel des lampes à incandescence et surtout en raison de leur emploi peu techniquement étudié, ne peut être atteint.

On s'est généralement contenté de substituer une lampe du type projection dans les armatures des projecteurs à arc ; or, cette adaptation est particulièrement à déconseiller à tous points de vue : surfaces des foyers lumineux dissemblables, disposition, forme et homogénéité différentes font que les optiques ne sauraient convenir aux deux cas indifféremment.

Il est surprenant que l'on n'ait, nulle part, vu faire un essai d'utilisation rationnelle du flux lumineux « avant » des lampes à incandescence, soit par un petit miroir récupérateur de renvoi, soit par un dispositif lenticulaire directeur.

Les armatures elles-mêmes ne conviennent pas au remploi, car les lampes à incandescence sont toujours volumineuses et demandent une bonne ventilation pour avoir une longue vie.

Les armatures ne portent généralement que peu d'ouïes de ventilation et le boisseau est presque obturé par le ballon de la lampe qui, aussi, approche trop du miroir.

Ce manque d'étude et d'appropriation aux besoins est assez particulier aux Studios de Cinématographie et plus encore de Photographie et l'on constate, avec surprise, à quel point la branche lumineuse est négligée et hors de l'attention des metteurs en scène qui, par ignorance, ou économie mal comprise, risquent de compromettre le fruit de leurs efforts de réalisation et de gâcher les frais parfois très considérables qu'ils ont engagés.

Aucune normalisation n'est de règle dans l'éclairage des Studios ; chaque chef de service ou directeur d'entreprise travaille en vase clos, à sa conception personnelle et il serait fort désirable qu'ils s'adressassent à nos Sociétés techniques d'Etudes pour l'éclairage. On ne verrait plus, ainsi, des panneaux composés de lampes piquées devant un fond plus ou moins émaillé blanc, donnant une lumière sans portée et sans direction, ou bien des miroirs paraboliques avec, au foyer, si l'on peut dire, une lampe sphérique opale de dimension égale au quart ou au tiers de leur diamètre.

Nous sommes au regret de constater que, bien que l'emploi des lampes à incandescence ait fait réaliser une économie de près de 50 pour 100 dans la consommation électrique des éclairages d'ambiance par l'usage, généralisé, de petits foyers multiples, les progrès de qualité des appareils destinés aux éclairages photochimiques sont loin d'approcher ceux réalisés dans la branche « éclairage domestique » et, surtout « industriel ».

Pourtant, cette année, les fabricants de lampes ont, répondant à la demande de leur clientèle, créé des types de lampes fort intéressants par leur puissance

On a vu utiliser des lampes de 5 000 W et 10 000 W à un seul filament disposé sur un plan.

Une telle forme permet leur emploi judicieux dans un système optique tel que celui des projecteurs de studios ce qui ne serait pas le cas si le filament se présentait en forme de cage d'écureuil tel qu'il existe dans les lampes pour phares côtiers à optique périphérique.

Ces lampes de 10 000 W présentent quelques particularités : elles ne peuvent fonctionner que le culot en bas ; celui-ci se fixe par colliers ; des conducteurs souples, garnis de cosses et isolés par des perles de verre, amènent le courant à l'extrémité des électrodes de la lampe.

Contrairement à ce que l'on pourrait supposer, le filament est, en quelque sorte, pendu aux extrémités des électrodes qui se terminent en crosse, ce qui a pour effet de placer ce point de soudure, toujours

délicat, dans une atmosphère de gaz très chauds, mais a l'avantage de laisser la dilatation se produire aisément, sans traction ou déformation sensibles sur ces points d'attache du filament ; il n'empêche que bien des lampes périssent par fusion à ces soudures.

En outre, la grille du filament est soutenue en haut et en bas, par un certain nombre de petits crochets analogues à ceux employés dans toutes les lampes du type projection.

Le ballon de la lampe, afin d'éviter la fusion du verre par la chaleur dégagée par le filament et véhiculée par les gaz inclus, présente dans la partie diamétralement opposée au culot, un renflement très accentué que l'on peut appeler dôme de condensation des vapeurs de tungstène.

Dans le socle de la lampe se trouve une poudre analogue à du carborundum qui, par balancement de la lampe éteinte, peut être amenée à frotter et enlever les dépôts opacifiant les parois de cristal du ballon.

Une telle lampe mesure environ 70 cm de haut, sur 30 cm de large, et est prévue pour durer environ 200 h dans de bonnes conditions de ventilation et d'allumage.

Pour éviter la surintensité due à l'application de la pleine tension sur le filament *froid*, donc, de relativement faible résistance, il est recommandable de n'appliquer qu'une tension réduite ou d'insérer dans le circuit d'alimentation une simple résistance additionnelle en fer, que l'on mettra hors circuit au moment de la prise de vue.

Dans les lampes à incandescence de faible intensité, nous enregistrons quelques modifications qui eussent pu être profitables, si elles n'avaient été contre-balancées par des novations moins heureuses.

Les fins de spirales de filaments ont été axialement garnies d'une âme métallique, en sorte que le serrage des électrodes peut être fait puissamment.

La dimension des ballons a été augmentée, mais le dépoli est devenu plus opaque et réparti sur tout l'intérieur de la lampe.

Aussi, le rendement lumineux de telles lampes n'est pas accru et la ventilation étant gênée par l'obstruction des réflecteurs, la durée des lampes n'est pas prolongée.

Nous avu aussi des lampes avec métal déposé sur le verre : dans le cas d'argent la destruction est rapide ; du chrome déposé par vaporisation se conserve beaucoup mieux malgré la chaleur et les frotte-

ments. Certains de ces miroirs avaient une forme de couronne placée du côté opposé au culot.

En ce cas, il importe que le filament ne se trouve pas exactement au centre du ballon, pour éviter que les rayons réfléchis ne viennent se recouper sur la source de lumière.

Dans le cas d'un miroir convexe, cette condition n'est pas nécessaire, mais la projection par un même type de projecteur est plus divergente.

Enfin, nous assistons à des essais de composition de lumière pan-chromatique par mélange de sources de lumière diversement colorées.

Ce serait peut-être la meilleure façon d'utiliser les anciens matériels à tubes à vapeurs de mercure ; encore faudrait-il que les tubes à Néon puissent se substituer exactement à ceux-là sur les appareils existants.

Peut-être pouvons-nous l'espérer.

LES PROGRÈS DE L'OPTIQUE PHYSIOLOGIQUE

par le Docteur Emile HAAS

RÉSUMÉ

I. — *Travaux anatomo-physiologiques de M. ROCHON-DUVIGNEAUD sur la vision des oiseaux.*

II. — *Considération sur les phénomènes de sommation (sommation d'énergie et sommation « de finesse ») au niveau des centres nerveux visuels, à propos de faits classiques, de l'article de M. A. STROHL, de la note de M. FLORIAN.*

III. — *Travaux de M. J. MALASSEZ sur la répartition de l'énergie dans les couleurs composées.*

I

Parmi les travaux d'optique physiologique parus en 1929-1930 et venus à ma connaissance, je n'ai rien trouvé qui fût immédiatement applicable à l'art de l'éclairage. C'est pourquoi, en acceptant d'écrire ce rapport, j'ai demandé la permission de m'écarter des applications directes, et de faire purement et simplement une revue d'optique physiologique.

Les méthodes de la physiologie et de la médecine paraissent aux ingénieurs bien différentes de celles de la physique. Je voudrais montrer, par un exemple concret, qu'elles ne manquent pas d'une certaine rigueur, et même de toute la rigueur compatible avec la nature de leur objet.

J'ai choisi comme exemple la série des travaux de M. ROCHON-DUVIGNEAUD sur la vision des oiseaux, travaux commencés depuis longtemps, et dont chaque année voit se rectifier et se préciser les résultats.

Il est bien rare que le sens d'une recherche expérimentale soit entièrement nouveau. En dehors des quelques grands inventeurs qui ont proprement fondé les sciences actuelles sur des principes simples et nouveaux, nous sommes tous contraints de partir de faits considérés comme acquis, d'hypothèses considérées comme démontrées, les mettant en œuvre avec plus ou moins d'imagination et d'ingéniosité. L'imagination ne joue alors que dans le cadre d'une certaine discipline ; à ce compte elle fournit cependant de beaux et nombreux résultats.

M. ROCHON-DUVIGNEAUD est donc parti d'un certain nombre d'hypothèses anatomo-physiologiques, que je rappellerai tout d'abord.

L'œil des vertébrés est formé d'un système optique et d'un appareil récepteur. Le système optique est composé d'une série de membranes à courbures quasi-géométriques (la cornée, les deux faces du cristallin), séparant des milieux d'indice différent (l'air, l'humeur aqueuse, le corps vitré). L'examen seul du système montre qu'il doit se comporter comme un système de dioptries centrés, et cela est confirmé par l'expérimentation.

Le système optique de l'œil peut, notamment, former des images réelles d'objets situés dans toute une série de plans de l'espace.

Ces images réelles resteraient inutilisées si elles n'étaient pas reçues sur une membrane sensible, la rétine, qui constitue le premier élément de l'appareil récepteur. Mais la rétine elle-même resterait sans utilité, si les impressions qu'elle reçoit n'étaient pas transmises aux centres nerveux supérieurs, et notamment au cerveau, seul organe de la *perception consciente*. L'appareil récepteur comporte donc, non seulement la rétine, mais les nerfs optiques, les centres et faisceaux nerveux intermédiaires, et finalement la zone visuelle de l'écorce cérébrale.

Toutes ces notions semblent solidement établies, car :

1° L'image réelle ne cesse pas de se former sur la rétine, même lorsque celle-ci, ou toute autre partie de l'appareil récepteur, est dégénérée, ou morte ;

2° Par contre il suffit de la destruction de l'une quelconque des parties sus-énoncées de l'appareil récepteur, pour que la perception consciente n'ait plus lieu, même en la présence d'une bonne image réelle à la surface de la rétine.

Les anatomistes ont été beaucoup plus loin. Etudiant le système optique de l'œil, ils ont été amenés à penser que celui-ci, à la façon des systèmes optiques ordinaires, ne peut former de bonnes images que lorsque les points-objets sont situés sur l'axe principal, ou sur des axes secondaires peu écartés de l'axe principal. Si l'on se souvient, en même temps, que la rétine est très étendue, et qu'elle revêt intérieurement plus de la moitié du globe de l'œil, on conclut qu'une faible partie de l'aire rétinienne doit seule recevoir des images nettes.

En fait la partie de la rétine qui avoisne l'axe principal présente une structure toute spéciale. On lui donne le nom de *macula lutea* ou tache jaune, à cause de son apparence sur l'œil humain énucléé, et

le centre de la tache jaune prend le nom de fovea centralis ou fosse centrale, parce qu'il est en retrait sur les parties voisines. (Actuellement d'ailleurs, et surtout dans le langage de l'anatomie comparée, on tend à étendre à la totalité de la macula l'appellation de fovea, parce qu'en réalité toute la macula est en léger retrait sur le reste de la rétine. C'est dans ce dernier sens que nous emploierons le mot fovea.) Chez l'homme, et chez la plupart des vertébrés, la fovea ne possède pas d'autres éléments sensoriels que les cônes rétinien qui lui forment une sorte de pavage très serré. Le reste de la rétine possède deux sortes d'éléments sensoriels, des cônes dont la section droite est supérieure à celle des cônes de la fovea, et des bâtonnets mêlés aux cônes.

Le fait que la rétine n'est composée que de cônes dans la région de la fovea, joint au fait que la formation d'images nettes n'est possible que dans la région de la fovea, voisine de l'axe optique principal, amènent naturellement la conclusion que les cônes sont les organes nécessaires à la perception de fins objets. Le pouvoir séparateur dont jouit le système optique au voisinage de l'axe principal resterait inutilisé si les images n'étaient pas reçues sur une région rétinienne douée d'un bon pouvoir séparateur, c'est-à-dire composée uniquement de cônes, et de cônes fins.

Le champ visuel (ou étendue angulaire de l'espace dans laquelle un œil immobile peut percevoir des objets), est, chez l'homme, d'environ 140 ou 150 degrés dans le méridien horizontal, dont 4 à 6 degrés seulement correspondent à la fovea. L'étendue totale de la rétine sensible est donc considérable, mais seuls sont vus nettement les objets correspondant à une très petite étendue angulaire de l'espace. Cette dernière considération explique les mouvements des yeux que l'on peut observer chez une personne qui lit. Suivant la longueur des lignes, elle effectue quatre, cinq ou six saccades, de manière à partager chaque ligne en autant de segments, assez courts pour que l'image de chacun d'eux puisse être contenue en entier dans les limites de la fovea.

Enfin des considérations, dans lesquelles je n'entrerai pas pour le moment, ont amené à penser que si les cônes sont essentiellement les organes du sens des formes ou du pouvoir séparateur, les bâtonnets sont les organes du sens lumineux brut, et de l'adaptation à l'obscur.

Chez l'homme normal, la partie de l'espace qui peut former son image sur la rétine de l'œil droit est à peu près la même que celle qui forme son image sur la rétine de l'œil gauche. Autrement dit, les

champs de chacun des yeux sont à peu près confondus. Il n'y a guère qu'une petite partie de l'espace, tout-à-fait sur la droite, qui ne puisse être perçue que par l'œil droit, et qu'une petite partie de l'espace, tout à fait sur la gauche, qui ne puisse être perçue que par l'œil gauche. En gros, chaque œil voit les mêmes objets, et nous avons deux yeux ; cependant les objets extérieurs ne sont pas vus doubles.

L'explication de ce dernier fait réside dans le mode de connexion de la rétine avec les centres nerveux supérieurs. On constate que les nerfs optiques, qui partent respectivement de la rétine de l'œil droit et de la rétine de l'œil gauche pour se diriger vers le cerveau, se divisent de façon particulière. Chacun des nerfs optiques se divise en deux groupes de fibres. Les unes, dites croisées, se rendent à l'hémisphère cérébral du côté opposé. Les autres, dites directes, vont se mêler aux fibres croisées de l'autre œil, et se rendent par conséquent à l'hémisphère cérébral du même côté. L'entrecroisement des fibres est appelée, par les anatomistes, le chiasma.

Ainsi l'hémisphère droit reçoit des fibres directes de l'œil droit et des fibres croisées de l'œil gauche ; l'hémisphère gauche reçoit des fibres directes de l'œil gauche et croisées de l'œil droit. Ainsi peut-on expliquer que deux impressions correspondant à un même objet, simultanément produites sur chacune des deux rétines, se recombinent dans le cerveau, et ne donnent plus lieu qu'à une perception unique.

Si l'on n'avait pas pu constater directement l'entrecroisement partiel des fibres optiques, on aurait été bien obligé néanmoins de supposer son existence, qui seule explique la fusion dans la conscience des impressions respectives à chaque œil.

Cette disposition a pour conséquence un phénomène particulier, très utile en pathologie humaine et en physiologie comparée. Si l'on éclaire brusquement un seul œil, de façon notablement plus intense que l'autre, on constate que non seulement la pupille de l'œil sur-éclairé se contracte, mais encore la pupille de l'autre œil. On a donné à ce phénomène le nom de réflexe consensuel à la lumière, et le mélange des fibres optiques l'explique bien. Puisque les fibres optiques de l'œil sur-éclairé vont se mêler en partie aux fibres de l'œil sous-éclairé, elles abordent concurremment le centre nerveux qui commande aux mouvements de la pupille sous-éclairée, et ce centre donne effectivement l'ordre de contraction, de la même façon que si l'excitation lumineuse avait porté directement sur l'œil sous-éclairé.

Il est particulièrement intéressant de constater que le réflexe consensuel n'existe pas chez les animaux dont les fibres optiques droites et gauches ne se mêlent en aucune proportion, chez les oiseaux par exemple dont les nerfs optiques sont entièrement croisés, de façon que la rétine droite corresponde exclusivement à l'hémisphère gauche, et réciproquement. M. ROCHON-DUVIGNEAUD était parti de là pour admettre primitivement que ces animaux n'ont pas de champ visuel commun aux deux yeux, mais il a ensuite écarté lui-même cette hypothèse, pour les raisons que je dirai plus loin. En tout cas, ses observations ultérieures ne diminuent pas la valeur expérimentale du réflexe consensuel.

Le lecteur est actuellement armé, en gros, pour comprendre le mécanisme des solutions que M. ROCHON-DUVIGNEAUD a données aux problèmes de physiologie comparée qui lui avaient été imposés à la suite de ses observations d'anatomiste.

I. — *a*) Chez un grand nombre d'oiseaux (corbeau, pic, geai, merle, loriot, huppe, pie, sitelle, pinson, mésange à tête noire, cormoran, mouette rieuse, caille, perdrix rouge, ramier), la fovea est située approximativement au pôle postérieur de l'œil, en un endroit voisin de l'intersection de l'axe optique principal avec la rétine. Il n'y a donc aucune difficulté d'admettre que des images nettes puissent s'y former, et que la fovea joue, dans ces cas, son rôle habituel de récepteur à bon pouvoir séparateur.

b) Mais chez les Rapaces Nocturnes (moyen duc, hulotte, chevêche), et chez le martinet, la fovea est absolument excentrique et située dans la partie tout à fait temporale de la rétine. Si l'on fait une coupe de tels yeux, que l'on trace ensuite sur la coupe la ligne droite qui passe approximativement par les centres de courbure de la cornée et du cristallin, c'est-à-dire l'axe principal du système optique, on constate que son intersection avec la rétine est extrêmement éloignée de la fovea.

Si l'on s'en tient à l'examen pur et simple des coupes, on s'étonne que des images puissent se former sur une fovea aussi excentrique ; et s'il s'en forme néanmoins, nous serions fondés à penser, d'après ce que nous savons des systèmes optiques, qu'elles ne peuvent être que de très médiocre qualité.

Dès lors on en vient à se demander pourquoi la nature a donné à ces animaux le fluxe d'un fovea, c'est-à-dire d'un récepteur à bon pouvoir séparateur, au voisinage d'un axe secondaire très oblique, selon lequel l'appareil optique ne peut avoir qu'un très mauvais pouvoir séparateur.

c) Enfin, chez les Rapaces Diurnes (buse commune, autour, épervier, milan noir, crécerelle) et chez l'hirondelle de cheminée, on constate l'existence de deux foveae dans chaque rétine. La première est centrale, elle occupe une situation analogue à celle de la fovea des oiseaux du premier groupe ; son interprétation fonctionnelle n'offre pas de difficulté. La seconde est excentrique, comme dans le deuxième groupe, et soulève les mêmes difficultés. De plus, on se demande pourquoi ces animaux possèdent deux foveae au lieu d'une.

II. — Une deuxième sorte de difficultés à résoudre provient de la situation des yeux des oiseaux par rapport au plan médian de la tête. Si nous prenons comme type l'être humain et les singes supérieurs, nous trouvons des axes optiques parallèles et des globes mobiles dans l'orbite. Ainsi s'explique le fait signalé plus haut : à savoir que les objets vus par l'œil droit sont presque tous les mêmes que ceux vus par l'œil gauche. De plus, l'existence de fibres optiques partant respectivement des deux yeux pour aboutir à chacun des hémisphères cérébraux explique la fusion, dans la perception consciente, des images relatives à chaque œil et communes aux deux champs.

Chez les oiseaux au contraire, les axes optiques principaux sont en général très divergents l'un par rapport à l'autre, et les yeux sont immobiles dans l'orbite, de sorte qu'il est difficile d'admettre à priori qu'il existe un champ visuel commun aux deux yeux.

Corrélativement, il n'existe, chez les oiseaux, que des fibres optiques croisées, c'est-à-dire que les fibres venues de l'œil droit vont toutes à l'hémisphère cérébral gauche, et réciproquement, de sorte qu'il est difficile de comprendre par quel mécanisme pourraient se fusionner les perceptions des champs respectifs à chaque œil, en admettant, ce qui est contraire à la première observation, que les champs aient une partie commune, c'est-à-dire fusionnable.

Une ressource explicative consisterait à penser qu'il existe chez les oiseaux non seulement des fibres croisées, mais encore des fibres di-

rectes, et que la raison pour laquelle ces dernières n'ont pas été vues consiste dans ce qu'on n'a pas su les trouver. Mais, s'il en était ainsi, les oiseaux auraient un réflexe lumineux consensuel, témoin de la présence, dans chacun des hémisphères cérébraux, de fibres venant des deux yeux. Or, les oiseaux n'ont pas de réflexe lumineux consensuel.

III. — Dans une série de travaux s'étageant sur plus de dix années, M. ROCHON-DUVIGNEAUD a pu, grâce aux documents anatomiques qu'il avait rassemblés, et dont la plupart sont dus à ses observations personnelles, poser ces problèmes tels qu'ils viennent d'être énoncés. M. ROCHON-DUVIGNEAUD a été plus loin, et les a résolus en partie.

Ces premiers pas dans la solution ont été obtenus par la méthode de ROCHON-DUVIGNEAUD pour déterminer le champ visuel des animaux. L'auteur, après avoir décapité l'animal, fait dans la tête une coupe tangente au pôle postérieur des yeux, puis dégage bien complètement, par dissection, les trois quarts postérieurs des globes de la graisse orbitaire qui les environne.

Dès lors, en plaçant la tête ainsi préparée au centre d'un arc métallique (ou périmètre), de courbure appropriée, et en promenant une source de lumière suffisamment brillante le long dudit arc, il devient possible à un observateur, placé derrière les yeux de l'animal, d'apercevoir les images rétinienne de la source, par transparence au travers de la sclérotique. Lorsque les images se forment au delà des limites de la rétine, il se trouve qu'elles tombent sur une partie opaque de la coque oculaire. Ainsi, l'étendue angulaire du champ visuel de chaque œil est directement mesurée. pour un azimut donné, par toute la longueur d'arc telle qu'on puisse y placer la source sans cesser d'en observer l'image au travers de la sclérotique.

Il va de soi qu'en orientant l'arc périmétrique dans différents azimuts, il devient possible de tracer le champ visuel complet.

M. ROCHON-DUVIGNEAUD a obtenu de cette façon, chez les oiseaux, des résultats de grande importance. Il a vu : 1° que la formation d'images sur la fovea latérale est possible, lorsque les rayons incidents viennent, très obliquement, du côté interne ou nasal du champ ; 2° qu'il existe une petite portion du champ visuel de l'œil droit commune avec une égale partie du champ de l'œil gauche.

A la vérité, les foveae centrales ne participent jamais à la vision binoculaire ; elles correspondent au champ propre à chaque œil. Mais, chez les oiseaux pourvus de foveae latérales, le champ commun aux deux yeux est précisément la partie de l'espace qui forme ses images sur les foveae latérales, de sorte que le champ commun est en même temps un champ de vision nette.

Par conséquent, après avoir admis, antérieurement aux expériences faites avec l'arc périmétrique, que les yeux des oiseaux voyaient séparément, comme les mains de l'homme touchent séparément, M. ROCHON-DUVIGNEAUD a été conduit à penser, à la suite de la constatation d'un champ visuel commun, que ces animaux pouvaient effectuer, pour cette petite partie de l'espace, la fusion binoculaire.

Je ne puis mieux faire, ici, que de citer intégralement les conclusions de M. ROCHON-DUVIGNEAUD.

« Donc, les deux foveae centrales regardent en avant et en dehors, chacune à 30° à droite et à gauche de l'axe du bec et par conséquent tout à fait indépendamment l'une de l'autre. » (Il s'agit ici de la Crécerelle. La valeur absolue des angles indiqués est légèrement différente chez d'autres oiseaux, mais le sens général des résultats et conclusions reste le même.)

« Les foveae latérales regardent binoculairement en avant. »

On pourrait donc dire que l'oiseau de proie (et aussi les hirondelles) possède un *trident visuel*, trois points de vision nette, un au milieu et deux latéraux. »

« Les foveae centrales étant d'une structure plus complexe que les latérales, possèdent une meilleure acuité ; elles sont les foveae de recherche, de fixation attentive. »

« C'est pourquoi l'oiseau de proie quand il explore, cherche, examine, ne regarde pas en face, mais un peu de côté suivant l'une de ses lignes visuelles latérales et absolument comme les oiseaux n'ayant qu'une fovea centrale, c'est-à-dire comme la grande majorité des oiseaux. »

« Quand il fond, de plusieurs centaines de mètres, sur une proie souvent mobile, ou quand il ne se nourrit, comme l'hirondelle, que d'insectes saisis au vol, l'oiseau doit réaliser simultanément une direction très précise et une excellente acuité (champ binoculaire pourvu d'une acuité centrale). »

« C'est là l'usage et la raison d'être des foveae latérales que l'on trouve exclusivement chez les Prédateurs, quel que soit le groupe ornithologique auquel ils appartiennent. »

On peut appeler les foveae latérales *foveae de direction*.

« Les oiseaux qui en sont dépourvus, c'est-à-dire la très grande majorité des oiseaux, possèdent toujours, comme nous l'avons établi, un champ binoculaire plus ou moins étendu, qui, étant situé devant eux, est leur champ de direction. Mais il ne comprend pas, chez eux, de point de vision nette. Quand ce point de vision nette et binoculaire se constitue par l'apparition des foveae latérales, l'oiseau devient capable de saisir au vol des proies vivantes et mobiles (rapaces, hirondelles) et de vivre exclusivement de ce genre de chasse. Les oiseaux dépourvus de foveae latérales ne voient pas assez nettement dans leur champ visuel binoculaire pour capturer des proies mobiles avec une pareille précision. Ce genre de chasse ne peut être chez eux que l'exception et non la règle. »

IV. — Si l'on examine la méthode employée, il est difficile de ne pas admirer que des problèmes aussi difficiles, et qui semblent a priori insolubles, puissent recevoir des solutions présentant toute la vraisemblance possible en pareille matière, et, pour tout dire, aussi raisonnables.

Il faut cependant remarquer que l'existence d'un champ visuel commun aux deux yeux n'entraîne pas nécessairement, par voie syllogistique, la nécessité de la fusion binoculaire.

Le champ visuel appartient en effet à l'espace ; il est susceptible d'être exactement mesuré par une méthode objective, telle que celle qu'a décrite Rochon-Duvigneaud pour la première fois.

La fusion binoculaire appartient au contraire à la conscience. Dès qu'il n'est plus possible, comme cela a lieu seulement chez l'être humain, de la démontrer par des méthodes subjectives, il ne reste plus, comme moyen de grande probabilité, que la preuve que l'on pourrait tirer de l'analogie structurale (fibres du nerf optique d'un seul côté allant aux deux hémisphères cérébraux), ou de l'analogie fonctionnelle (réflexe lumineux consensuel), avec ce qui existe chez l'homme.

Or, ni l'une ni l'autre de ces analogies n'a été observée, et la conclusion de M. Rochon-Duvigneaud se fonde principalement sur une hypothèse finaliste, à savoir qu'il est impossible que la nature ait doué

les oiseaux d'un champ visuel commun, si ce n'est pour les faire bénéficier de la fusion binoculaire.

Nous sommes obligés, pour l'avenir, de rechercher, par les méthodes anatomiques, les connexions entre les deux rétines, qui achèveraient de justifier les conclusions de ROCHON-DUVIGNEAUD.

Il est d'ailleurs possible que ces connexions ne se fassent pas, chez les oiseaux, par un chiasma périphérique, mais par des associations interhémisphériques.

Il est encore possible que des connexions interhémisphériques n'entraînent pas, comme cela a lieu pour un chiasma périphérique, de réflexe lumineux consensuel.

Il reste à dire que les conclusions de M. ROCHON-DUVIGNEAUD, exactes ou non, sont fécondes, puisqu'elles nous indiquent la voie de recherches nouvelles, et cela est bien le critérium d'excellence le plus élevé que la philosophie scientifique actuelle assigne aux hypothèses de toute catégorie.

II

Je m'écarterai maintenant un peu de ces considérations d'anatomie comparée, pour faire remarquer que la vision binoculaire, même chez l'homme où son étude semble incomparablement plus facile, est une des fonctions les moins expliquées.

Dans un article paru au mois d'août 1929 dans les *Archives d'Ophthalmologie*, M. le Professeur André STROHL a bien mis en valeur les faiblesses de la théorie des points correspondants, si difficile pourtant à remplacer.

Une bonne partie de l'article de M. STROHL est consacrée aux procédés de mesure de l'acuité stéréoscopique. On donne ce nom à une quantité définie au moyen de la parallaxe stéréoscopique limite, qui est la somme des angles dont tournent les deux yeux quand ils fixent successivement deux points séparés par la plus petite distance en profondeur discernable. Cette acuité stéréoscopique intéresse non seulement les radiographes, pour la localisation en profondeur des projectiles et des lésions sur les clichés stéréoscopiques, mais elle intéresse au plus haut degré la défense nationale, depuis le développement de l'aviation et des télémètres binoculaires.

On admet qu'une acuité stéréoscopique normale ne comporte pas une parallaxe stéréoscopique supérieure à 8 secondes. Dans une communication faite en avril 1929 à la Société d'Ophtalmologie de Paris, et dont les observations faites avec le télémètre binoculaire constituaient le point de départ, M. FLORIAN attirait l'attention sur cette extraordinaire circonstance, qui donne à la vision en profondeur un pouvoir séparateur d'une dizaine de fois supérieur à la vision monoculaire.

Sans doute les deux fonctions sont éminemment différentes, car l'acuité visuelle semble liée à la structure rétinienne, et plus exactement à la petitesse des cônes, tandis que l'acuité stéréoscopique semble liée à la conscience des quantités de contraction auxquelles les muscles oculaires sont astreints pour réaliser le fusionnement des images. Mais c'est là précisément que gît le mystère, car l'on ne comprend guère en quoi le sens musculaire puisse nous aider à séparer les objets, si les angles dont il s'agit sont notablement inférieurs à ceux que peut séparer l'organe dont la structure nous semblait la plus fine, à savoir la rétine.

Il ne faut pas désespérer cependant de voir un jour ces difficultés raisonnablement expliquées. Déjà nous savons que l'acuité binoculaire (je veux dire la somme des acuités monoculaires pour deux points du même plan, et non pas l'acuité stéréoscopique) se révèle presque toujours supérieure à l'acuité du meilleur œil. Il semble impossible de focaliser cette « sommation de finesses », si j'ose ainsi m'exprimer, autrement que dans les centres nerveux supérieurs de la vision, puisqu'elle ne se manifeste que simultanément avec la mise en jeu de ces centres. Mais il n'est pas impossible qu'elle soit aussi conditionnée par une raison périphérique, non encore étudiée actuellement.

Or, la question de la sommation des acuités monoculaires pour deux points d'un même plan, et la question de l'acuité stéréoscopique, ont peut-être plus de parentés qu'on ne le supposerait a priori.

D'ailleurs, avant d'aborder les sommations que je me suis permis de nommer « de finesses », il conviendrait d'étudier le plus intéressant, le plus simple, des phénomènes de sommation par les centres, c'est-à-dire la sommation des sensations lumineuses brutes. Le fait est connu et utilisé depuis longtemps et se résume en quelque mots : un objet uniformément éclairé est vu plus brillant avec les deux yeux qu'avec un seul. Cela indique que la sommation des énergies excitatrices peut se faire non seulement au niveau de la cellule sensorielle

de la rétine, mais au niveau des cellules nerveuses des centres supérieurs.

Or, nous ne saurions nous contenter de constater le fait, ce qui est déjà quelque chose, ni de noter la première interprétation qui vient d'en être donnée. Il faudrait pénétrer plus avant dans la voie que nous ouvre cette interprétation, tâcher de trouver d'autres phénomènes de sommation d'énergie analogues, et d'en dégager les lois. Ceci nous permettrait peut-être d'y rattacher les sommations que j'ai appelées « de finesses » et dont je veux, pour terminer, signaler un dernier exemple bien connu.

La fraction différenciable de Bouguer, ou fraction minima dont la brillance d'une plage doit différer de la brillance d'une plage voisine pour qu'elles puissent être distinguées l'une de l'autre, est plus petite en vision avec les deux yeux qu'avec un seul œil. Voici un quatrième fait, banal pour les physiciens, tout à fait mystérieux pour les physiologistes et qui complète la série des trois « sommations de finesses » dont le mécanisme s'impose à nos méditations de demain.

Les progrès apparents de la science sont lents ; mais ceux qui ont accumulé les faits que je viens de signaler permettent à d'autres d'en dégager certains caractères communs, de poser peu à peu le problème, et peut-être finalement de le résoudre.

III

Je ne veux pas terminer cette revue sans signaler une importante communication de M. J. MALASSEZ à l'Académie des Sciences, du 24 février 1930, et qui malheureusement est venue trop tard à ma connaissance pour qu'il me soit permis d'en parler assez longuement et de façon critique.

M. MALASSEZ a comparé, aux points de vue du flux énergétique et de la visibilité, des couleurs formées d'un mélange de deux teintes spectrales mêlées, avec la couleur spectrale pure de même aspect. La plage simple est égalisée photométriquement avec la plage composée, et les flux énergétiques relatifs à chacune d'elles sont mesurés à l'aide d'une pile thermo-électrique. Dans ces conditions, et dans l'étendue relativement petite du spectre visible qu'il a pu explorer, l'auteur a

constaté que la rétine est toujours plus sensible à l'énergie sous forme de radiation simple que sous forme de mélange de radiations.

Parmi les travaux dont j'ai eu l'occasion de parler dans cet article, ceux de M. MALASSEZ sont peut-être destinés à une application moins lointaine dans l'art de l'éclairage, mais les raisons industrielles qui nous font préférer actuellement des sources presque toujours composées ne sont pas près de disparaître, de sorte que l'auteur de ces recherches et probablement d'autres après lui, auront tout le loisir de vérifier et d'étendre ces premiers résultats.

TRAVAUX DES SECTIONS

TRADUCTEUR BAUDOT NON ROTATIF SYSTÈME EGLIN-CARTIER ⁽¹⁾

par M. Ch. BONNIN

Ingénieur à la Société anonyme des Ateliers Carpentier.

Rôle du Traducteur. — On sait que dans le système télégraphique Baudot, l'organe désigné sous le nom de traducteur a pour fonction de recueillir les courants constituant les signaux et de traduire ces signaux en un texte imprimé en caractères typographiques ordinaires.

Les signaux, à leur arrivée à la station réceptrice, sont d'abord collectés par l'organe appelé Distributeur, dont le rôle est de répartir les courants élémentaires, se succédant dans le temps, sur des circuits séparés et disposés d'une certaine façon dans l'espace.

Les signaux Baudot comprennent 5 éléments parmi lesquels on distingue les éléments de travail et les éléments de repos. Quand ils sont recueillis par le Traducteur, les éléments de travail sont représentés par des courants courts dirigés chacun sur l'électro-aimant qui correspond à son rang dans la série des cinq éléments du signal. Les éléments de repos correspondent simplement à des absences de courant.

On voit donc, que les Traducteurs, quelqu'en soit le modèle, comprennent essentiellement 5 électros aimants dont les 5 armatures, par leur jeu ou leur immobilité, reproduisent le signal.

Dans les modèles de Traducteur existant actuellement, les armatures déplacent des leviers appelés aiguilleurs et engagent ces leviers sur le chemin d'une came navette montée sur un arbre affecté d'un mouvement de rotation uniforme provoquant ainsi la traduction du signal, opération mécanique qui s'effectue par l'intervention de cames et de leviers réagissant entre eux d'une certaine manière en composant leurs mouvements.

Les organes mécaniques sont supportés, les uns comme les leviers aiguilleurs, par le bâti de l'appareil, les autres comme la came navette et la roue portant les caractères par l'arbre tournant.

(1) Communication présentée à la séance du 27 juin 1930 de la 5^e Section, sous la présidence de M. Reynaud-Bonin.

Synchronisation du Traducteur. — On comprend aisément que la rotation de l'arbre du traducteur doit s'effectuer dans certaines conditions. Il faut, notamment, qu'elle soit en synchronisme avec l'arbre du distributeur et maintenue dans une orientation ou phase bien déterminée de manière que les compositions des mouvements des cames et des leviers aiguilleurs se produisent à l'instant convenable par rapport à l'arrivée des courants excitateurs des électro-aimants. A cet effet, le traducteur est toujours actionné par un moteur spécialement adapté, c'est-à-dire muni des organes qui en assurent le synchronisme en phase.

Moteur de traducteur. — Selon les cas, on utilise un moteur à poids ou un moteur électrique entraînant le traducteur par engrenages ou par poulie et courroie. Un modérateur de vitesse impose à l'ensemble une vitesse déterminée un peu supérieure à celle du régime et un frein mécanique ou électrique commandé par le Distributeur absorbe, à chaque tour, l'avance prise par le traducteur. On obtient ainsi un synchronisme suffisamment approché et suffisamment en phase pour assurer un fonctionnement correct de tous les organes.

Vitesse variable du Distributeur. — Pendant longtemps et jusqu'à l'apparition de la transmission automatique, la vitesse de rotation du Distributeur est restée fixée immuablement à 180 tours par minute. Le synchronisme du Traducteur se trouvait suffisamment assuré par l'emploi conjugué du modérateur de vitesse et du frein.

Depuis quelques années, on envisage la possibilité de modifier la vitesse des distributeurs aux heures les plus chargées en substituant la transmission automatique à la transmission manuelle et on a songé à transformer en conséquence le dispositif de synchronisation du Traducteur.

Dans ces conditions l'abandon du modérateur de vitesse s'impose. On peut supprimer cet organe quand on utilise un socle moteur électrique dont on règle la vitesse au moyen d'un rhéostat de telle sorte qu'elle soit un peu supérieure à celle du Distributeur, le frein électrique (ou mécanique) se charge d'absorber l'excédent de vitesse.

On utilise aussi des moteurs électriques synchrones comme l'électromoteur Grunenwald qui reproduisent automatiquement les variations de vitesse du Distributeur.

Mais ces diverses solutions présentent l'inconvénient de faire travailler sans arrêt des organes lourds en les soumettant à une série inin-

terrompue d'impulsions alternativement accélératrices et retardatrices nécessaires à la marche synchrone.

De plus les Traducteurs rotatifs restent constamment en mouvement même pendant les heures où les télégrammes s'espacent et où le trafic quotidien se ralentit.

Traducteur non rotatif. — Le traducteur non rotatif, objet de la présente description est basé sur un principe tout à fait différent des précédents.

Il est dû à la collaboration de MM. Eglin, Mécanicien Principal à l'Administration des P.T.T., et Cartier, Ingénieur-Conseil aux Ateliers J. Carpentier, ancien collaborateur de Baudot.

La pensée directrice qui a présidé à l'élaboration de cet appareil a été le remplacement du mode d'impression actuel, lent et occupant tout le temps compris entre l'apparition de deux signaux successifs par un mode d'impression plus rapide et tout à fait indépendant de la vitesse du Distributeur.

Le mode choisi est celui qui est utilisé dans les machines à écrire à barres porte-caractères.

Le Traducteur non rotatif est actionné uniquement par des électro-aimants, aussi bien pour produire les déplacements des organes de sélection que pour produire les mouvements mécaniques de l'impression.

La durée totale de l'impression d'un signal est réduite au temps minimum (0,1 sec environ). L'appareil se met en œuvre automatiquement à l'arrivée du train d'impulsions constituant le signal, exécute sa fonction complètement et reste au repos en attendant l'arrivée du train suivant.

Dans ces conditions, le Traducteur non rotatif peut suivre toutes les cadences, stables ou variables que le distributeur est capable de lui imposer. Ce sont les temps d'arrêt de l'appareil entre les signaux qui subissent les variations éventuelles de la durée des intervalles. Aucun réglage, aucune intervention ne sont nécessaires pour le passage d'une cadence à une autre.

Description. — L'appareil a l'aspect d'une machine à écrire dépourvue de son clavier alphabétique. A l'avant et à la partie supérieure, les barres porte-caractères supportent chacune une lettre et

un chiffre ou signe de ponctuation. Ces barres sont disposées en corbeille semi-circulaire (fig. 1). A l'avant, le chemin de bande peut se déplacer tout entier parallèlement à lui-même pour produire l'in-

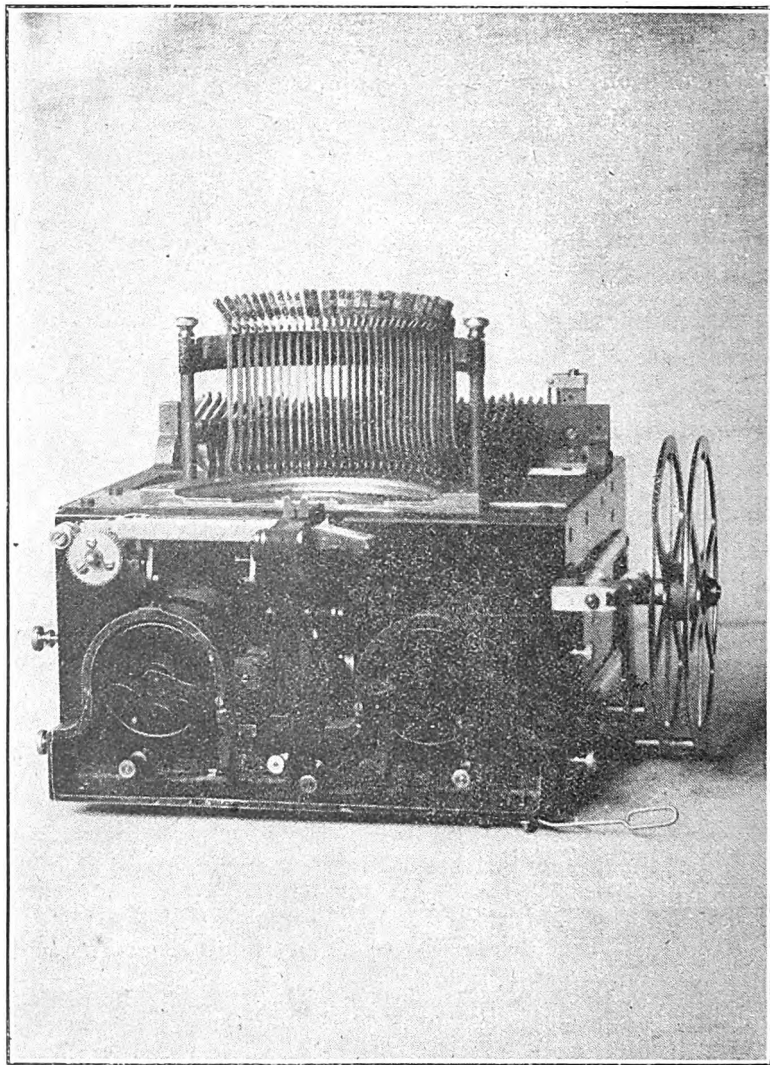


Figure 1.

version, c'est-à-dire pour présenter aux barres porte-caractères un point de frappe correspondant soit aux lettres, soit aux chiffres ou aux signes de ponctuation.

Sous le chemin de bande sont les bobines qui emmagasinent le ruban encreur et le mécanisme qui en commande automatiquement l'avancement.

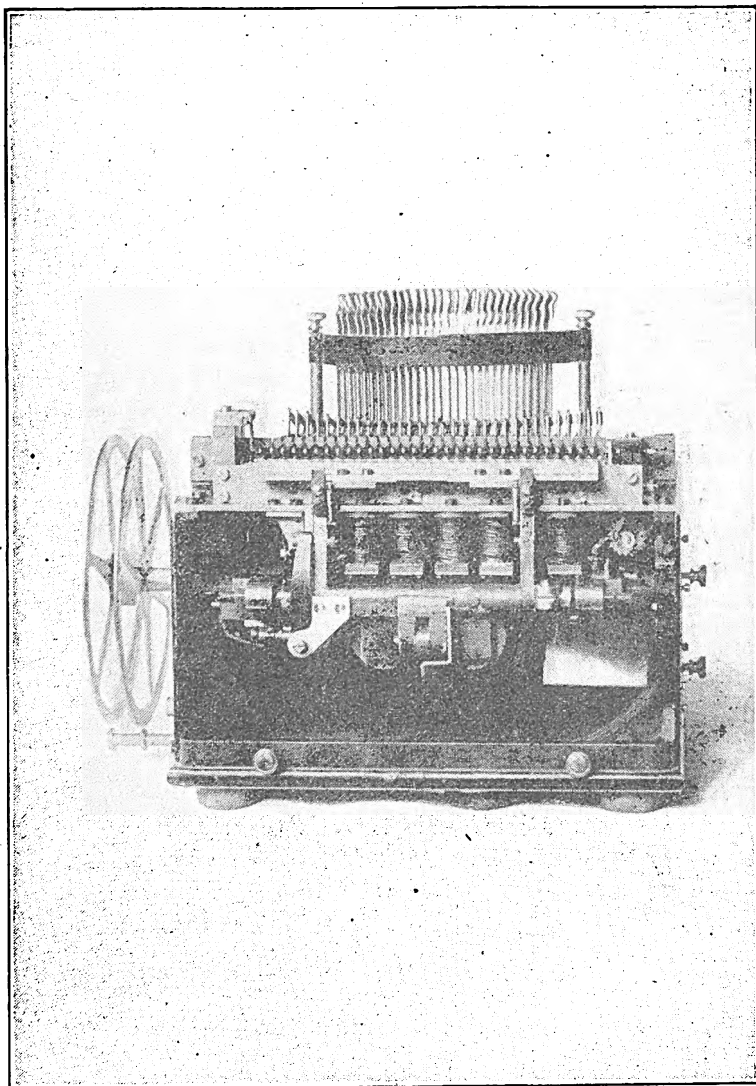


Figure 2.

A l'arrière (fig. 2) on reconnaît sous une forme nouvelle, les organes essentiels du Traducteur Baudot, les cinq électro-aiguilleurs, le combineur, l'électro de travail et un électro supplémentaire (électro-

relais) dont la fonction est uniquement de fermer le circuit de l'électro de travail, sur une impulsion venue du Distributeur.

Les cinq électro-aiguilleurs sont branchés sur les plots de la boîte à coupures (première couronne) comme ceux d'un traducteur ordinaire et fonctionnent avec les mêmes valeurs de courant. L'électro de travail est alimenté par une prise indépendante ne passant pas par le Distributeur. L'électro-relais est branché à la boîte à coupures (troisième couronne) et travaille avec le courant local du poste. Toutefois, le circuit de cet électro n'est fermé que si un signal a été reçu dans les électros-aiguilleurs, de sorte que pendant les périodes où aucune réception n'a lieu, l'électro de travail n'est pas excité et le Traducteur reste complètement au repos.

Combinateur. — Le combinateur est du type connu à 5 barres. Ces barres sont placées transversalement sous les tirettes horizontales qui commandent les barres porte-caractères. Sous l'action des cinq électro-aiguilleurs, excités ou non excités, elles se déplacent longitudinalement ou restent au repos, reproduisant ainsi par leurs positions relatives la combinaison correspondant au signal. Celles qui sont déplacées figurent les éléments de travail et les autres les éléments de repos. Les 31 combinaisons du code Baudot peuvent être ainsi représentées.

Des encoches sont pratiquées sur la rive supérieure des barres de sélection au-dessous des tirettes de commande des barres porte-caractères, mais la répartition des encoches sur les barres de sélection est pratiquée de telle manière qu'une seule des 31 tirettes puisse trouver sous elle pour chaque combinaison une rangée de cinq encoches qui lui permette de s'abaisser quand l'ensemble des tirettes vient reposer sur les 5 barres.

Impression. — La tirette, ainsi sélectionnée, est ensuite saisie par l'armature de l'électro de travail dans son mouvement de va et vient et provoque la frappe d'une lettre ou d'un chiffre (ou bien le déplacement du chemin de bande quand la combinaison correspond à l'inversion, c'est-à-dire au passage de la série lettres à la série chiffres ou réciproquement).

L'électro de travail entre en jeu aussitôt la combinaison préparée par le placement des barres de sélection. Son armature attirée, puis abandonnée à l'action de ses ressorts de rappel produit successivement les fonctions mécaniques suivantes :

a) Quand l'armature est attirée : Déverrouillage des tirettes. Sélection. Impression du signal ou inversion. Rupture du courant de travail. Réarmement de l'électro-relais.

b) Quand l'armature est libérée : Avancement du papier bande. Avancement du ruban encreur. Verrouillage des tirettes. Réenclenchement des barres de sélection.

Ces fonctions étant accomplies, le Traducteur est prêt à recevoir une nouvelle série de courants et à imprimer de la même manière le caractère suivant.

ERRATA

à la Communication de M. VAN DER POL
(Bulletin d'Août 1930)

Page 835 : Fig. 11 — incomplète.

Page 839 : Fig. 14 b — numérotation incorrecte.

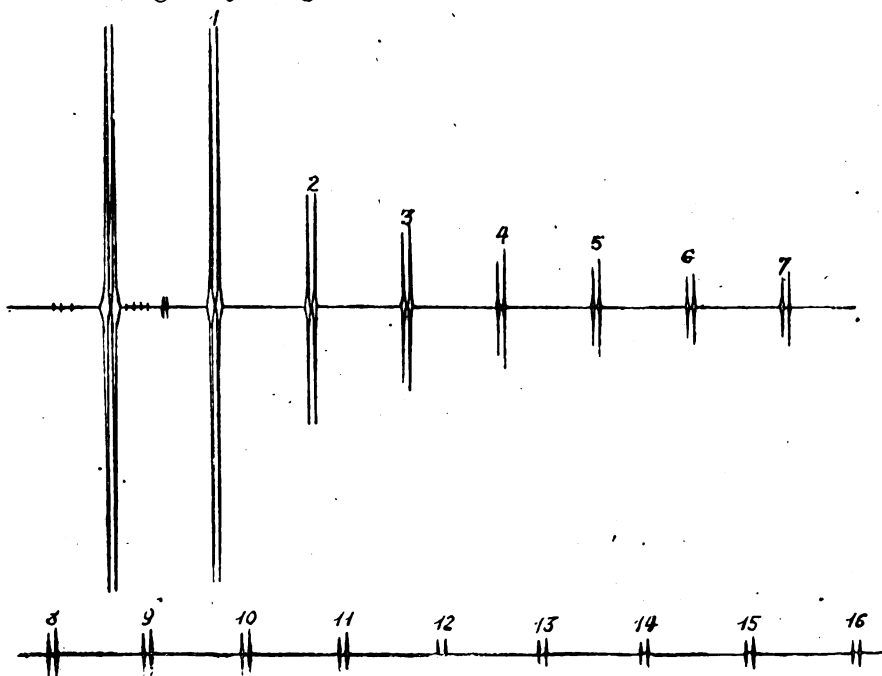


Fig. 11

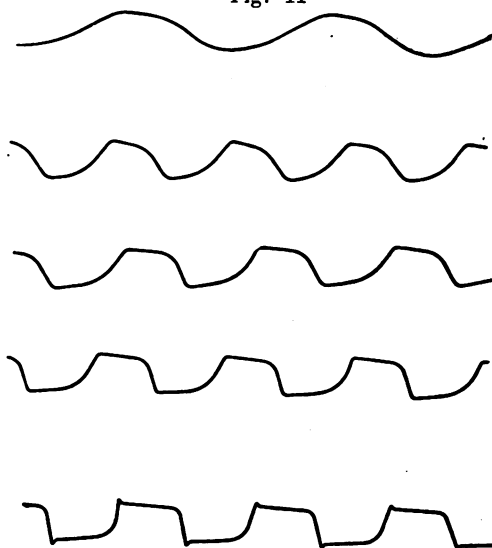


Fig. 14b.

LES TRANSFORMATEURS DE RÉGLAGE ⁽¹⁾

par M. DUVERNE

Attaché à la Direction de la Société Savoisienne de Constructions électriques

Par suite du développement des réseaux électriques, on est amené, de plus en plus, à commander la tension de distribution en dehors de la centrale et à proximité des centres d'utilisation.

En raison des grandes puissances et des tensions élevées mises en jeu aujourd'hui, l'emploi des régulateurs d'induction ne répond plus

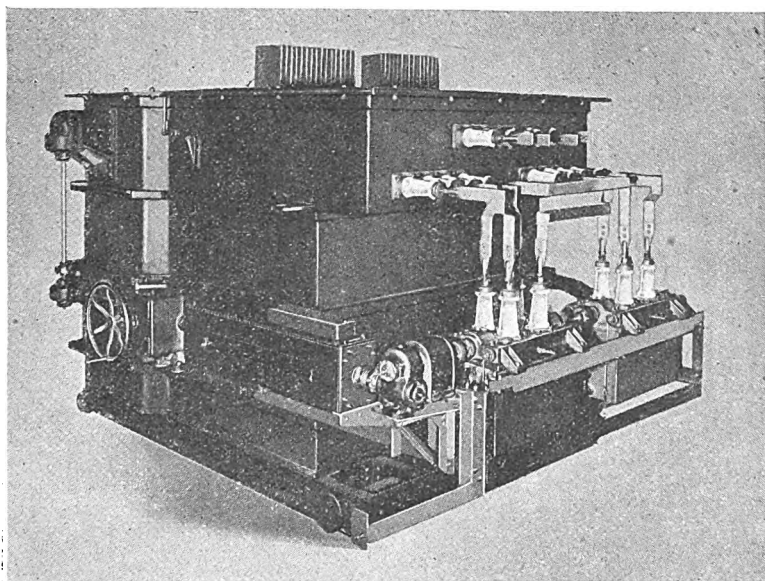


Fig. 1. Régulateur en charge automatique formé d'un groupe Scott de 9000 kVA 50 p. s. — Vue d'un des transformateurs monophasés de 12 000/24,5 à 57,2 V en 55 échelons.

Refroidissement par circulation d'huile à l'extérieur.

aux nécessités actuelles. Le condensateur synchrone est réservé à des solutions très particulières, car son prix et son entretien sont très onéreux ; de plus, il présente toutes les sujétions ordinaires des machines tournantes. C'est le transformateur de réglage qui offre le

(1) Résumé d'une communication présentée par M. Duverne à Lyon le 18 mars 1930 au groupe Sud-Est de la S.F.E.

maximum d'avantages tant au point de vue prix d'achat et frais d'entretien qu'au point de vue des possibilités, pour ainsi dire, sans limites que, par construction, il permet d'envisager.

En principe, il est formé d'un transformateur ou autotransformateur pourvu sur les enroulements de prises en nombre variable et d'un combinateur à l'aide duquel on enclenche ces prises sur le réseau ou sur un circuit d'excitation. La formule est très souple. Toutes sortes de combinaisons peuvent être envisagées avec les enroulements, et

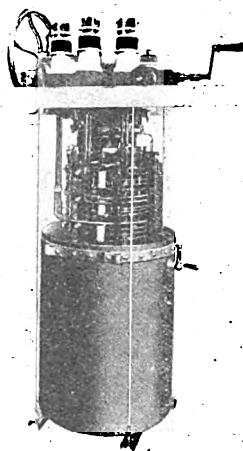


Fig. 2. — Contracteur pour le réglage en charge de la tension d'un autotransformateur de 1 075 kVA à 5 000-5 240-5 480/5 000 V.

L'appareillage de commutation peut être construit pour de hautes tensions sans grandes difficultés. La variation de tension continue, théoriquement obtenue avec le régulateur d'induction, est sans grande importance pratique, d'une manière générale, puisque le réglage n'est fait qu'avec un certain asservissement dû, en partie, à l'inertie des pièces en mouvement. D'autre part, les échelons de réglage du transformateur sont ramenés à des valeurs très faibles, grâce à des dispositifs particuliers permettant de subdiviser l'intervalle de tension compris entre 2 prises consécutives du transformateur principal.

Le fonctionnement du combinateur est analogue à celui d'un réducteur d'accumulateur. Il agit de manière à coupler une résistance

entre deux prises consécutives au moment où celles-ci se trouvent court-circuitées pour le passage de l'une à l'autre. La résistance peut être une simple résistance ohmique ou une self. D'autre part, les coupures de courant sont faites à l'aide de sectionneurs à rupture brusque, tout au moins dans les appareils modernes.

Tout l'appareillage peut être plongé dans l'air ou dans l'huile, sauf en ce qui concerne les interrupteurs à rupture brusque qui sont toujours dans l'huile. Les résistances ohmiques sont en fer, en fonte, en acier spécial, ou en alliage tel que le constantan. Les selfs ne présentent aucun caractère particulier.

On distingue les régulateurs à fonctionnement rapide, qui permettent d'effectuer le passage d'une prise en une fraction de seconde,

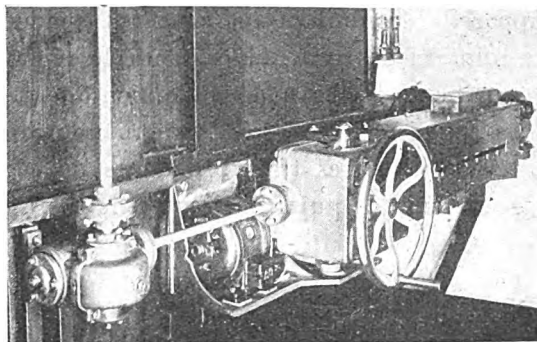


Fig. 8. — Dispositif de commande d'un régulateur en charge automatique.

des régulateurs à marche lente avec lesquels une manœuvre demande de 3 à 10 s. Dans les premiers, le passage d'un échelon est fait en 1 tour ou 1 demi-tour de volant. Les seconds, au contraire, réclament plusieurs tours de l'arbre de commande général, pour le changement de tension.

En pratique courante, on sépare le transformateur de l'appareillage formé par le combinateur, les résistances et les sectionneurs ; toutefois, dans le but de réduire l'encombrement et le prix, on peut loger dans la même cuve que le transformateur, le combinateur et les résistances. Dans ce cas, seuls les interrupteurs à rupture brusque sont placés dans une petite cuve séparée. Moyennant quelques précautions, on peut même réunir dans une seule cuve tout l'appareil y compris les sectionneurs, mais cette construction n'est pas très logique en raison de la nécessité où on se trouve de découvrir périodiquement

les pièces de contact des interrupteurs en vue des remplacements éventuels.

L'entraînement du changeur de prises est fait à la main, ou par l'intermédiaire d'un servo-moteur commandé à l'aide de boutons-poussoirs montés sur le tableau. Le fonctionnement peut encore être complètement automatique.

Les régulateurs automatiques sont utilisés dans toutes les installations où les réglages doivent être fréquents et où ils doivent répondre à une formule déterminée comme, par exemple, en ce qui concerne les fours d'électrochimie, système MIGUET et PERRON.

En résumé, les transformateurs de réglage sont d'emploi commode et sûr. Ils sont appelés à rendre de grands services aux industriels qui produisent, transportent ou utilisent l'électricité ; ceux-ci disposent, maintenant, d'appareils économiques d'excellent rendement, ne réclamant qu'un minimum de surveillance, pour le réglage de la tension, dans une certaine mesure, indépendamment de la centrale.

D'autre part, les problèmes posés par l'interconnexion des réseaux sont facilement résolus avec les transformateurs de réglage, en les faisant agir sur les facteurs de puissance respectifs des lignes au point de jonction.

OUVRAGES OFFERTS

A LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ELECTRICIENS

ECLAIRAGE ET CHAUFFAGE

Photographie des couleurs, par J. THOVERT, édité par Gaston Doin et Cie, à Paris, 8, place de l'Odéon (6^e). Un ouvrage broché, 17,5×11,5 cm., 300 pages. Prix 25 fr. (Don de l'éditeur). 1924.

RECHERCHES

L'Architecture de l'Univers, par PAUL COUDERC. Editeur Gauthier-Villars, 55, quai des Grands-Augustins, à Paris. Un volume in-8° 14×21 cm, broché, 176 pages, avec huit planches hors texte. Année 1930. Prix 20 francs. (Don des Editeurs.)

La planète Mars 1859-1929, par ANTONIADI E. M. Un ouvrage broché 28×23 cm., de 240 pages, édité par Hermann et Cie, 6, rue de la Sorbonne, à Paris. Prix 80 fr. (Don des éditeurs).

Œuvres scientifiques, par JULES JANSSEN et HENRI DEMÉRAIN, éditées par la Société d'Éditions géographiques, maritimes et coloniales, 184, boulevard Saint-Germain, Paris (6^e). Un ouvrage 25×16,5 cm., broché, 648 pages. Tome II, année 1930 (Don des auteurs).

AVIATION

L'Astronautique, par ROBERT ESNAULT-PELTERIE. Édité par A. Lahure, 9, rue de Fleurus, à Paris. Un volume broché 25×16 cm. 250 pages. (Don de l'éditeur.)

CONGRÈS — EXPOSITIONS — ACTES OFFICIELS

Classification décimale universelle de l'Institut International de Bibliographie. Palais mondial de Bruxelles. Un ouvrage relié de 1.532 pages, 26×20 cm. 1927-1929.

Comptabilité à résultats mensuels d'une Société à distribution d'énergie électrique. par DUBOULOZ MARIUS, édité par Dunod, 92, rue Bonaparte, à Paris (6^e). Un ouvrage de 25×16 cm., broché, 150 pages, année 1930. Prix 36 fr. 85 (Don de l'éditeur).

Congrès de Tokio 1929. Trois volumes. Don du National and International Development of Power Resources.

Mechanical engineering. Avril 1930. Anniversary. The official program of the fiftieth anniversary Celebration of the American Society of mechanical engineers.

FORMULAIRES — AIDE-MÉMOIRES — MANUELS

Monteur Electricien (Manuel pratique du), par LAFFARGUE J. et JUMAU L., édité par Gauthier Villars et Cie, 55, quai des Grands-Augustins. Un ouvrage de 18×13 cm., relié, de 934 pages, 1930 (Don de L. Jumau).

DIVERS

Œuvres de Maine de Biran, par PIERRE TISSERAND, éditées par Félix Alcan, 108, boulevard Saint-Germain (7^e), Paris. Un ouvrage en 2 volumes de 23×14,5 cm., brochés, de 555 pages (Don de l'éditeur). Prix 80 fr. 1930.

IL Y A TRENTE ANS

Réunion ordinaire mensuelle du 7 novembre 1900

Présidence de M. E. MASCART

M. ABRAHAM fait une communication sur la *stérilisation des eaux potables par l'ozone*.

Le conférencier décrit d'abord les procédés divers qui ont été proposés ou employés pour purifier les eaux d'alimentation : stérilisateurs par la chaleur avec récupération de celle-ci, filtres Chamberland, méthodes de coagulation et en particulier le procédé Anderson, filtres à sable, emploi des permanganates et de certains composés oxygénés du chlore.

Il rappelle que MM. Chappuis et Hautefeuille, qui étudièrent les propriétés de l'ozone, furent les premiers à en indiquer les qualités bactéricides.

Les premiers essais industriels de stérilisation de l'eau par l'ozone, entrepris par divers expérimentateurs depuis 1891, se heurtèrent à deux sortes de difficultés ; le manque de concentration de l'ozone et l'insuffisance de contact entre l'eau et l'ozone.

M. Abraham, avec M. Marmier, ont réalisé le contact de l'ozone et de l'eau dans une colonne analogue à celles qui sont employées dans l'industrie chimique pour le lavage des gaz. M. Tyndal a tenté d'appliquer un procédé de pulvérisation de l'eau sous forte pression dans des chambres d'ozone. Dans le même but, M. Otto a utilisé des émulseurs à basse pression, universellement employés aujourd'hui.

Le conférencier décrit l'appareil qu'il a employé pour la génération de l'ozone à une concentration élevée, ainsi que l'installation de stérilisation réalisée avec M. Marmier en 1898-1899 à l'usine municipale de la ville de Lille.

La communication de M. Abraham constitue une remarquable introduction à celle que M. P. Otto devait faire 28 ans plus tard, à la séance du 1^{er} décembre 1928.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS

SOMMAIRE

COMMUNICATIONS PRÉSENTÉES EN SÉANCE PUBLIQUE (1) :

La traction à accumulateurs dans les Mines (M. J. MILLE), p. 1265. — La foudre globulaire (M. E. MATHIAS), p. 1280.

TRAVAUX DES SECTIONS :

Contribution à l'étude des oscillations d'un alternateur ou moteur synchrone, (M. F. MARGAND), p. 1302.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 1340.

IL Y A TRENTE ANS, p. 1344.

Table méthodique des matières contenues dans le Tome X (4^e série), p. 1345.

Table des noms d'auteurs cités dans le Tome X (4^e série), p. 1355.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

La reproduction des mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des Auteurs.

Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant le manuscrit.

4^e série, tome X, n° 112.

LA TRACTION A ACCUMULATEURS DANS LES MINES ⁽¹⁾

par J. MILLE

Ingénieur en chef du Service Electrique à la Société des Mines de Lens

L'Amérique nous a devancés dans l'emploi de la traction électrique dans les galeries souterraines d'extraction du charbon. La puissance de ses gisements lui a permis de supporter facilement les frais d'installation de grandes galeries où peuvent circuler des trains à fort tonnage conduits par de grosses locomotives à trolley.

Ce système a bien été employé dès avant guerre par quelques-unes de nos houillères françaises avec des trains de moindre tonnage, mais les accidents que peuvent causer les étincelles du trolley en ont arrêté le développement et même interrompu l'usage en quelques endroits.

Il ne pouvait être question, même en Amérique, d'étendre le système du trolley aux galeries secondaires de plus petites dimensions qui accèdent aux chantiers d'abattage du charbon, et c'est là que l'accumulateur devait triompher nettement de son concurrent électrique.

Aussi autonome que le cheval, mais plus puissant que lui, il pouvait prétendre être admis partout, moyennant cependant quelques précautions dont nous parlerons tout à l'heure au sujet du matériel anti-déflagrant.

La lutte économique contre le cheval était des plus faciles, étant donné le gain important qui pouvait être réalisé dans la main-d'œuvre surtout pour les grosses locomotives de 600 t:km utiles qui remplacent une dizaine de chevaux et économisent ainsi neuf conducteurs sur dix.

L'accumulateur électrique et l'air comprimé

Mais l'accumulateur aurait la part trop belle s'il n'avait à lutter contre un concurrent plus redoutable que le cheval : l'air comprimé, qui ne produit aucune étincelle et n'exige aucune précaution spéciale dans les galeries les plus sujettes aux dégagements de gaz ou poussières inflammables.

Le problème, heureusement ne s'est pas posé d'après ce critérium, particulier à certaines mines grisouteuses, car nous n'en sommes en-

(1) Conférence présentée à la séance mensuelle du mercredi 7 mai 1930.

core actuellement à cet égard qu'aux premiers essais et c'est en traitant le cas des mines non classées grisouteuses que nous avons pu acquérir une expérience de cinq années dans la traction souterraine à accumulateurs.

La traction par locomotive à air comprimé dont le prix de revient s'établit à un taux un peu supérieur à celui que l'on obtient avec des accumulateurs, est mise en état d'infériorité manifeste sur trois points importants :

1° l'obligation de recharger les réservoirs d'air comprimé à 150 kg/cm² après un parcours d'environ 1 000 m à l'aller et 1 000 m au retour ;

2° le mauvais rendement des moteurs à air comprimé ;

3° la coïncidence de l'appel d'énergie fait par les compresseurs d'air à haute pression avec la pointe d'énergie correspondant à l'extraction du charbon.

Sur le premier point, la traction à air comprimé est limitée aux galeries de grand roulage, car l'installation de canalisations d'air comprimé à haute pression dans les galeries secondaires présente de telles difficultés et risques d'accidents qu'on y a renoncé jusqu'ici.

Sur le second point, relatif à la consommation d'énergie, nous pouvons indiquer que l'on peut pratiquement compter avec les accumulateurs sur une dépense d'énergie triphasée haute tension (y compris par conséquent la transformation en basse tension et en courant continu) de 150 à 200 Wh par tonne kilomètre utile transportée (charbon, terre ou matériaux).

Par contre, on trouve par l'expérience acquise que l'énergie consommée par les compresseurs d'air à haute pression alimentant les locomotives atteint normalement 1 000 à 1 100 Wh par tonne kilomètre transportée dans les mêmes conditions de trafic.

Le troisième point de vue, celui de la coïncidence de l'appel maximum d'énergie du compresseur avec la pointe d'extraction peut doubler sensiblement l'écart précédant à l'avantage de la traction à accumulateurs, c'est-à-dire établir le rapport $\frac{200}{1000 \times 2} = \frac{1}{10}$ entre les valeurs de l'énergie électrique consommée par les deux systèmes : accumulateur et air comprimé.

La charge des accumulateurs peut en effet très bien se placer aux heures creuses du diagramme de production d'énergie de la centrale

et justifier l'application d'un tarif affranchi pour une grande partie des frais d'amortissement et de personnel.

La traction souterraine à accumulateurs correspond ici au point de vue soutenu par les Sociétés de Transport par locomotives ou véhicules à accumulateurs, pour la réduction des tarifs d'énergie distribuée en dehors des heures normales de consommation.

La traction à accumulateurs est plus économique que la traction à essence

J'ajoute pour terminer la comparaison de la traction à accumulateurs avec les autres systèmes concurrents que le prix de revient de la traction par locomotive à essence essayée dans certaines mines, notamment dans la Sarre, a été jusqu'ici assez notablement supérieur à ceux obtenus avec l'air comprimé et les accumulateurs pour décourager les tentatives faites dans cette voie.

Traction par accumulateurs sur les petites voies ferrées industrielles

Ce qui vient d'être dit pour la traction électrique souterraine s'applique d'une manière générale aux voies étroites industrielles dans le cas où le système à trolley ne peut être envisagé par suite de la multiplication des voies, des aiguillages, du prix d'installation et d'entretien des équipements à trolley, des éclissages, etc...

Souvent la solution de la traction à accumulateurs emporte l'avantage sur le trolley par la souplesse qu'elle assure au trafic, du fait de l'autonomie des locomotives ou des tracteurs.

La pente d'équilibre favorise l'emploi de l'accumulateur

L'accumulateur a trouvé dans la traction minière un élément de succès qui s'adapte particulièrement bien à ses conditions d'emploi : la pente d'équilibre, qui lui permet d'égaliser pratiquement son régime de décharge à la montée et à la descente.

Le tracé des galeries de mines a pu en effet être établi pour favoriser la traction des berlines chargées de charbon vers le puits d'extraction, les berlines remontant à vide vers les chantiers d'abattage, sauf pour le transport des matériaux : bois, etc...

Les pentes d'avant-guerre déterminées pour un matériel roulant à coefficient de traction assez élevé s'élèvent à près de 10 mm par mètre. Celles que l'on trace aujourd'hui pour des berlines à rouleaux sont limitées à 4 mm et on arrive ainsi à réaliser à peu près l'égalité de travail dans les deux sens.

Malgré cette circonstance favorable et les avantages cités plus haut à l'encontre de ses concurrents le cheval et l'air comprimé installés depuis longtemps dans la place, l'accumulateur avait encore à faire ses preuves à l'égard des rudes conditions de l'exploitation souterraine, pour gagner la partie :

— Le travail intensif et régulier comparable à celui à la chaîne qui ne souffre aucun arrêt sous menace de blocage de l'extraction.

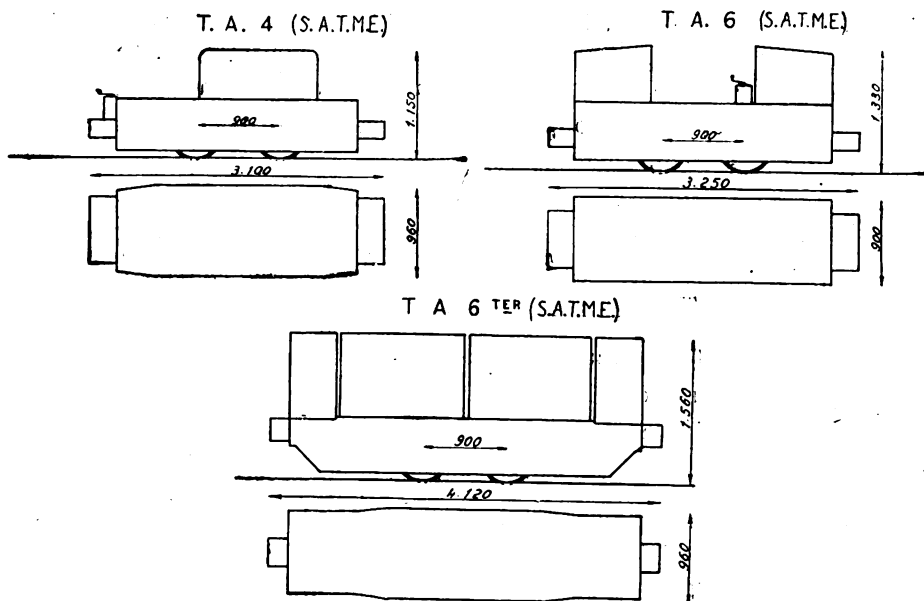
— Les chocs répétés.

— Les difficultés matérielles et psychologiques inhérentes aux innovations comportant une éducation préalable du personnel.

— Enfin la durée de son existence et le coût de son entretien qui représentaient les éléments économiques les plus aléatoires de son succès.

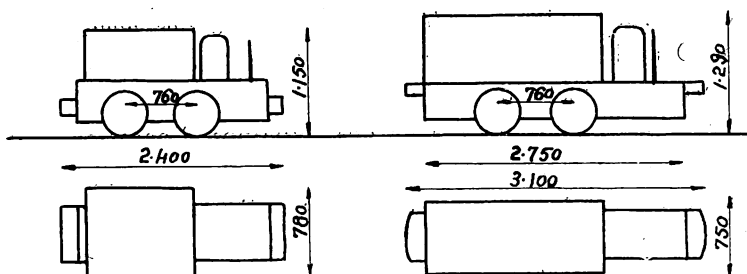
Historique de l'expérience

SCHÉMAS D'ENCOMBREMENT DES TYPES D'ÉTUDE DES LOCOMOTIVES JOURDAIN-MONNERET

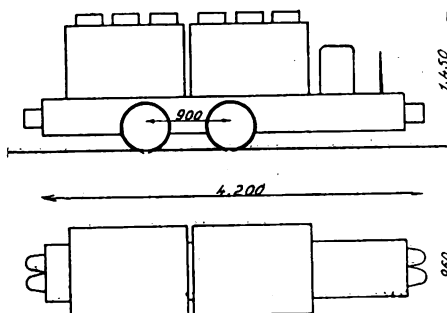


SCHEMAS D'ENCOMBREMENT DES TYPES ACTUELS DES LOCOMOTIVES

AUTOMATIC

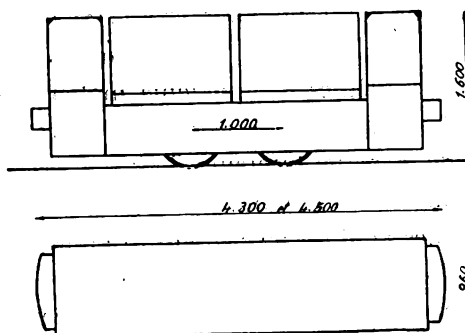


AUTOMATIC



Constructions Électriques de France — Jourdain-Monneret

C E. F ET T J. M. 8 (S.A.T.M.E.)



C'est par une proposition faite par la Maison Jourdain-Monneret en 1923 de prendre à l'essai un tracteur à 2 moteurs de 2.5 ch, type TA4 avec batterie fer-nickel de 220 Ah, qui rentrait sans conclusion d'un champ d'expérience minier, que se posa pour nous le problème de la traction à accumulateurs. (Voir les tableaux et schémas d'encombrement des différents types de locomotives.)

La rusticité de l'élément fer-nickel triompha des souvenirs défavorables que nous avons gardés de la fragilité des accumulateurs de traction et de leur prix d'entretien élevé car là était toute la question.

Par prudence technique et économique nous équipons rapidement une station de chargement avec des dynamos d'occasion, actionnées par des moteurs pris en magasin et nous mettons l'appareil en essai mais avec une batterie neuve de 350 Ah, l'autre s'étant trouvée fort mal d'un traitement antérieur avec de l'acide sulfurique au lieu de potasse.

Quatre mois d'essais sans aucun incident avec des trains de 16 berlines (trains normaux de la traction animale) pesant chacune 280 kg et portant 530 kg de charbon sur voie de 0,60 m avec pente de 8 à 10 m suffirent pour nous convaincre de l'opportunité d'une extension de l'expérience.

Deux tracteurs à 2 moteurs de 6 ch et vis sans fin type TA6 ainsi que 2 tracteurs type TA2 dits tracteurs-cheval à 2 moteurs furent commandés avec des batteries fer-nickel de 350 Ah ayant respectivement 48 et 24 éléments pour tirer des trains de 48 berlines et 16 berlines.

Nous songions déjà à standardiser nos équipements de traction en comptant toujours sur les régimes de décharge rapide (décharge en 3 h) escomptés depuis le début des essais, mais nous fûmes ramenés à temps à la décharge en 5 heures et à une augmentation du type des batteries par un fléchissement avertisseur de la capacité des accumulateurs en essais.

La capacité nominale des nouvelles batteries fer-nickel fut portée à 750 Ah et les tracteurs allongés en conséquence prirent le nom de TA6 *ter* en conservant les mêmes équipements moteurs et vis sans fin, les batteries de 350 Ah continuant à assurer la marche du premier tracteur TA4 et des deux petits tracteurs TA2.

Les deux tracteurs TA6 existants furent modifiés par nos soins pour les rendre semblables au TA6 *ter* à 2 postes de commande.

Tout ce matériel est actuellement amorti par les gains réalisés sur la traction animale et continue à assurer son service y compris l'ancêtre

TA4 que nous remonterons cependant bientôt pour l'employer au jour car sa marche est un peu trop lente.

Au cours de ces dernières expériences d'exploitation, la Société des Constructions Electriques de France nous proposa de mettre à l'essai une locomotive de sa construction à deux moteurs de 10 ch avec attaque par engrenage (figure 1).

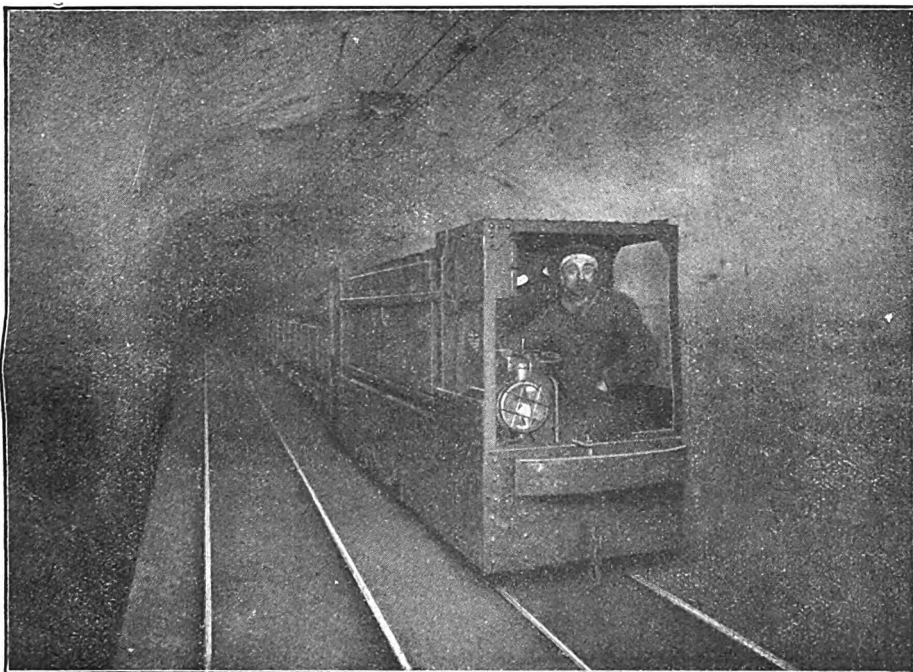


Fig. 1. — Locomotive des Constructions Electriques de France avec son train de berlines arrivant à l'accrochage

Cette locomotive pouvait porter soit une batterie alcaline S.A.F.T. de 48 éléments 750 Ah, soit une batterie au plomb Ironclad Tudor de 32 éléments 850 Ah.

Nous venions de recevoir en effet des offres de la maison Tudor pour l'essai de ses deux premières batteries du type Ironclad montées dans ses usines de Lille.

La deuxième batterie fut destinée à l'équipement d'une nouvelle locomotive de grand modèle construite par la Société Automatic (figure 2).

Cette machine comportait, avec un moteur de 15 ch, 2 vis sans fin accouplées et un seul poste de commande avec contrôleur anti-déflagrant et roulements à billes.

Enfin, la maison Jourdain-Monneret qui avait construit une locomotive TJM8 à engrenages pouvant porter soit une batterie de 60 éléments S.A.F.T. de 750 Ah, soit une batterie Ironclad de 40 éléments de

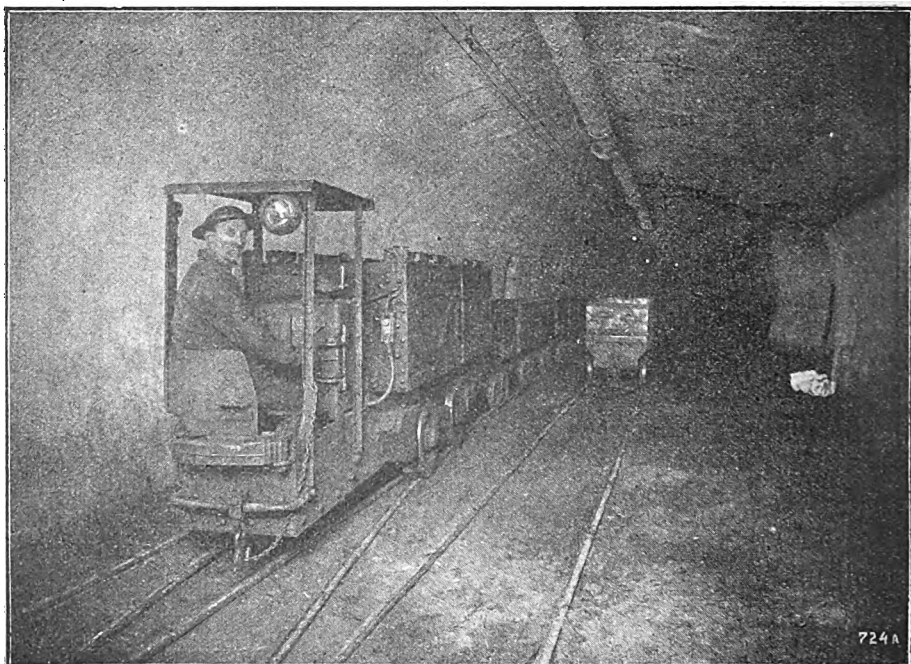


Fig. 2. — Locomotive « automatique » sur l'aiguillage de départ

850 Ah, la mit également à l'essai sur nos chantiers d'exploitation (figure 3).

Cette locomotive vint compléter avec les deux précédentes l'équipement de grosse traction de la fosse 7.

Elle reçut une batterie de 60 éléments S.A.F.T. de 750 Ah qu'elle porte encore et que nous remplacerons après ses 4 années de service par une batterie S.A.F.T. du nouveau modèle tubulaire dont la durée doit être portée à six ans.

C'est avec cette locomotive T.J.M.8 à engrenages que nous avons atteint les consommations les plus faibles de 55 Wh aux bornes du

moteur par tonne kilométrique utile à la vitesse moyenne de 12 km à l'heure.

La locomotive C.E.F. également à engrenages et à deux moteurs la suivit de très près avec 57 Wh ainsi que la locomotive Automatic à un seul moteur et 2 vis sans fin mais avec roulements à billes.

On peut dire pratiquement que ces trois machines ont la même consommation.

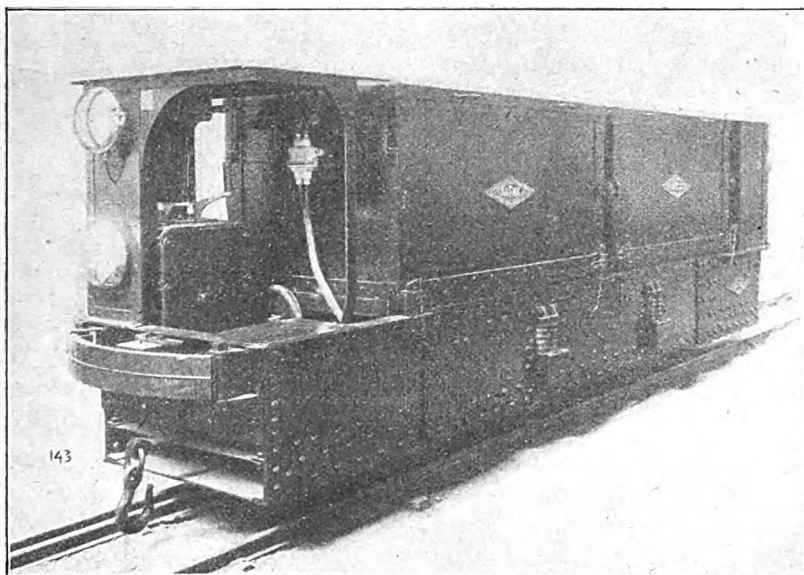


Fig. 3. — Locomotive Salme T. J. M. 8 (freins Jourdain-Monneret)

Petite traction

La question de la traction dans les grandes galeries étant résolue il restait à définir le type de locomotives à affecter à la traction dans les galeries secondaires

Les cotes de 2,40 m pour la longueur et 0,75 m pour la largeur préalablement admises par le service d'exploitation et que respectaient les 2 petits tracteurs TA2 convenaient parfaitement mais les batteries de 24 éléments de 350 Ah à décharge rapide dont j'ai parlé tout à l'heure ne nous permirent pas d'obtenir de ces deux engins un travail suffisamment rémunérateur.

La Société Automatic nous proposa l'essai d'un tracteur de même encombrement à un moteur de 6 ch et 2 vis sans fin (figure 4).

Ce tracteur nous permit d'effectuer des postes de 150 tonnes kilomètres utiles à la vitesse de 7 à 8 km à l'heure avec des trains de 16 berlines (figure 5).

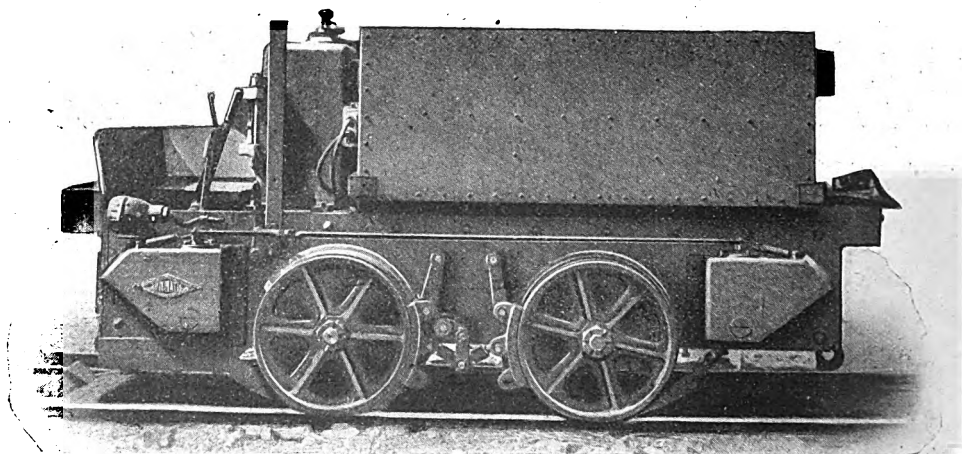


Fig. 4. — Tracteur-cheval « automatic »

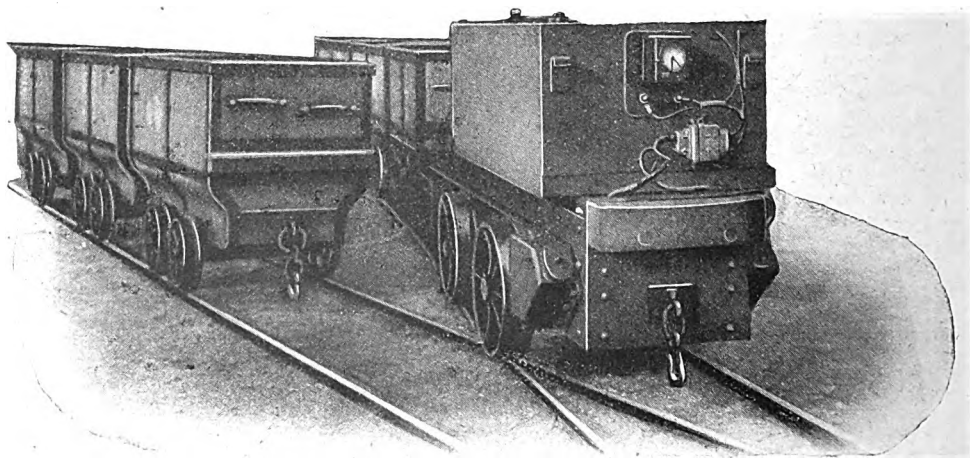


Fig. 5. — Tracteur-cheval « Automatic » avec un train.

Il était équipé avec 24 éléments I.B.B. 6 de 400 Ah 19 kWh.

Finalement, sur les indications de la Société Automatic, notre service d'exploitation modifia un peu son programme de petite traction et adopta le type de 300 tonnes kilomètres utiles à 1 moteur de 11 ch

dont les dimensions en plan, 2,75 m par 0,75 m, permettent l'admission dans les cages, c'est-à-dire éventuellement la charge au jour.

Quatre de ces tracteurs sont actuellement en service à la fosse 7 avec deux batteries Tudor de 26 kWh 30 éléments I.B.B.8 533 Ah et deux batteries S.A.F.T. 25 kWh nouveau modèle de 40 éléments T 10 500 Ah.

Les trains de 32 berlines conduits par ces tracteurs viennent se grouper par deux pour constituer les trains de 64 berlines que reprennent les locomotives de grosse traction allant vers le puits.

Les garages des trains ont dû être allongés pour permettre l'admission de 32 et 64 berlines.

Il semble bien que l'adoption de ces 2 types d'engins pouvant respectivement assurer un service de 300 à 600 tonnes kilomètres par poste répondent aux meilleures conditions économiques qu'il soit possible d'atteindre au fond.

Notre fosse 12 a bénéficié de tous les essais effectués à la fosse 7 tant pour la détermination des types de locomotives que pour l'équipement de la station de charge dont je vais vous dire quelques mots.

Cette fosse a de moins longs parcours à assurer que la fosse 7 qui était vraiment la plus susceptible de faire ressortir les avantages de la traction à accumulateurs.

2 locomotives type « Automatic » à un moteur de 20 ch et 2 vis sans fin avec batterie Ironclad de 40 éléments I.B.B.12, 850 Ah y assurent le trafic dans les galeries principales.

Il n'a pas été jugé utile de leur adjoindre des tracteurs de 300 tonnes kilomètres utiles.

Une locomotive de secours avec batterie S.A.F.T. assure les remplacements en cas d'incidents à l'une des deux autres et pour les visites sérieuses à faire à l'équipement qui nécessitent leur passage à l'atelier.

Une autre fosse va être équipée dans les mêmes conditions avec 3 locomotives « Automatic » et des batteries Ironclad mais avec du matériel entièrement antidéflagrant y compris les batteries dont les coffres sont hermétiquement fermés pendant le service et ouverts seulement pendant la charge

Nous serons donc prochainement fixés sur la valeur pratique de ces équipements antidéflagrants qui semblent bien avoir été réalisés pour remplir convenablement les conditions sévères imposées à ce genre de matériel.

Le tableau et les 2 graphiques ci-dessous indiquent les consommations et prix de revient des différents types de locomotives et tracteurs dont nous avons fait l'expérience.

Ils montrent l'importance du choix du type à adopter suivant l'importance du trafic.

ÉLÉMENTS DU PRIX DE REVIENT par t/km. utile (Phase d'exploitation)	CHEVAL		LOCOMOTIVES A ACCUMULATEURS			
	Taux d'amortis- sement	40 T/km	Taux d'amortis- sement	type 1:0 T/km	type 300 T/km	type 600 T/km
AMORTISSEMENT DE L'ÉQUIPEMENT :						
Cheval ou locomotive sans accu- mulateurs.....	20 %	0,10	15 %	0,10	0,09	0,08
Berlines supplémentaires.....	15 %	0,04	15 %			
Accumulateurs.....			35 %	0,25	0,22	0,19
Local : écurie ou garage et poste charge.....	14 %	0,04	14 %	0,01	0,01	0,01
Équipement électro-mécanique...		»	14 %	0,07	0,05	0,04
Totaux.....		0,18		0,43	0,75	0,32
MAIN D'ŒUVRE ET DIVERS :						
Cheval et loco.....		1,20		0,65	0,37	0,25
CONSUMMATION CHEVAL ET LOCO.....		0,36		0,10	0,07	0,05
Totaux généraux.....		1,74		1,18	0,81	0,62

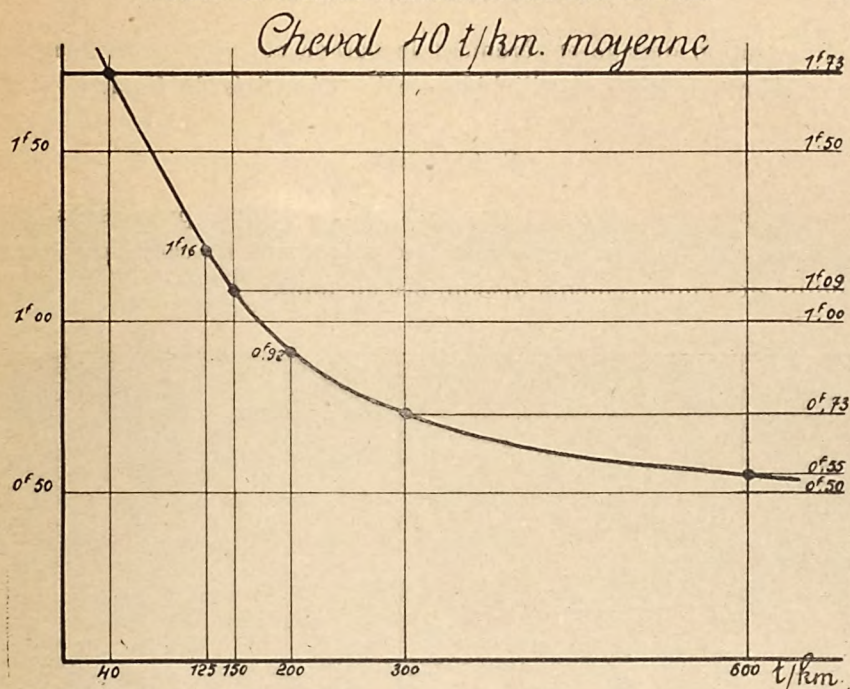
Bancs de charge. — Chariot roulant

Nous avons débuté avec les bancs de charge classiques placés de chaque côté de la voie d'arrivée des locomotives à la station génératrice.

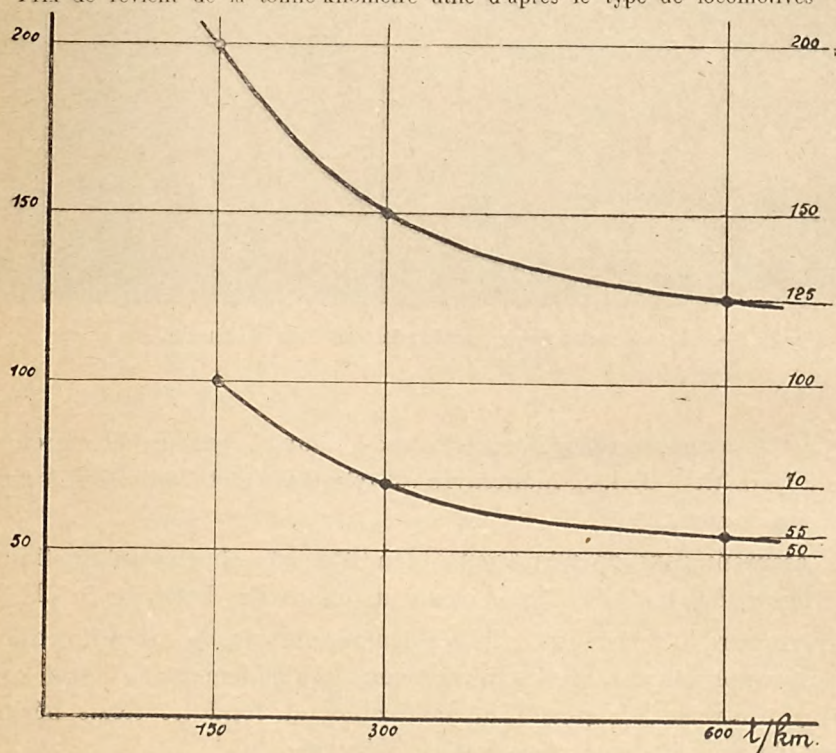
Ce genre d'équipement est assez encombrant et occasionne des frais de main-d'œuvre et des pertes de temps qui ne sont pas négligeables.

Depuis que nos batteries peuvent assurer un poste complet de 8 heures sans rechargement, nous les laissons sur les locomotives pour la charge et nous ne les déplaçons que pour l'inspection des moteurs, des réducteurs à vis sans fin ou des engrenages qui ne peut être effectuée au moyen de la fosse de visite.

Nous nous servons alors d'un chariot roulant sur poutre mobile qui donne toute satisfaction (figure 6).



Prix de revient de la tonne-kilomètre utile d'après le type de locomotives



T. 40994

Consommation en watt-heure par tonne-kilomètre. Courbe supérieure « aux bornes de la source haute tension ». Courbe inférieure « aux bornes des moteurs ».

Cette solution dégage entièrement le garage et évite de lui donner un encombrement peu conciliable avec les nécessités du fond.

Redresseurs

Les groupes convertisseurs que nous ayons équipés pour essais ont bien donné satisfaction, mais leur encombrement ne cadre pas avec l'exigüité des emplacements disponibles au fond.

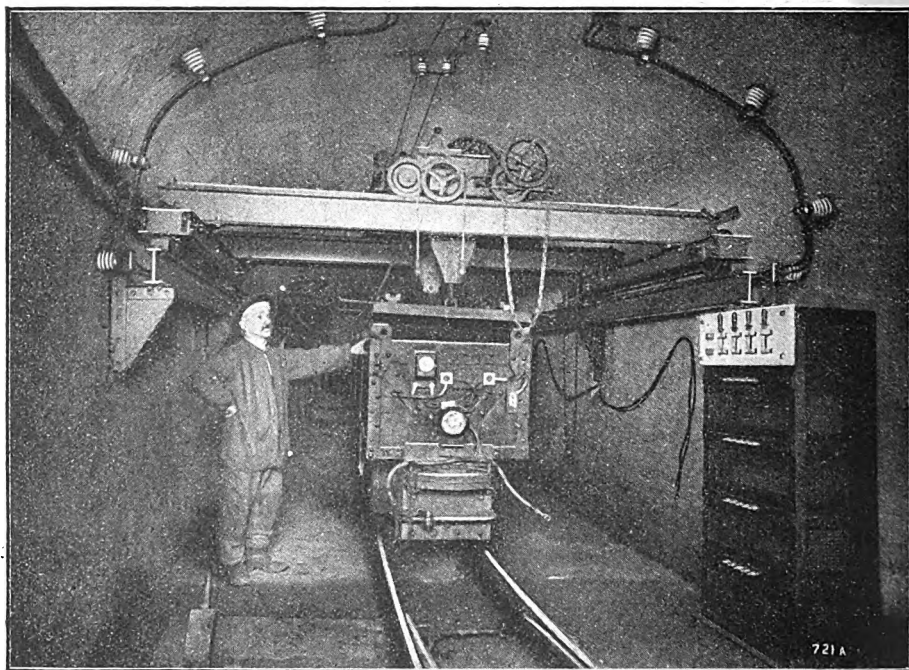


Fig. 6. — Poste de charge des accumulateurs avec son treuil de levage

Nous les avons remplacés par des redresseurs à vapeur de mercure type « Hewittic » dont la manœuvre est très simple et l'entretien à peu près nul (figure 7).

Ils assurent dans de très bonnes conditions la charge automatique en 2 temps des batteries Tudor et en un temps des batteries S.A.F.T.

Les Ateliers d'Orléans ont réalisé, depuis, des groupes rotatifs entièrement automatiques que nous mettrons probablement à l'essai car nous y trouverons la possibilité d'effectuer au fond les essais périodiques de capacité avec récupération d'énergie.

Nous avons moins en vue l'économie de courant qui sera négligeable que la simplicité et les facilités de réglage du procédé.

La décharge sur résistances exige plus de surveillance et correspond moins bien aux conditions de sécurité du fond.

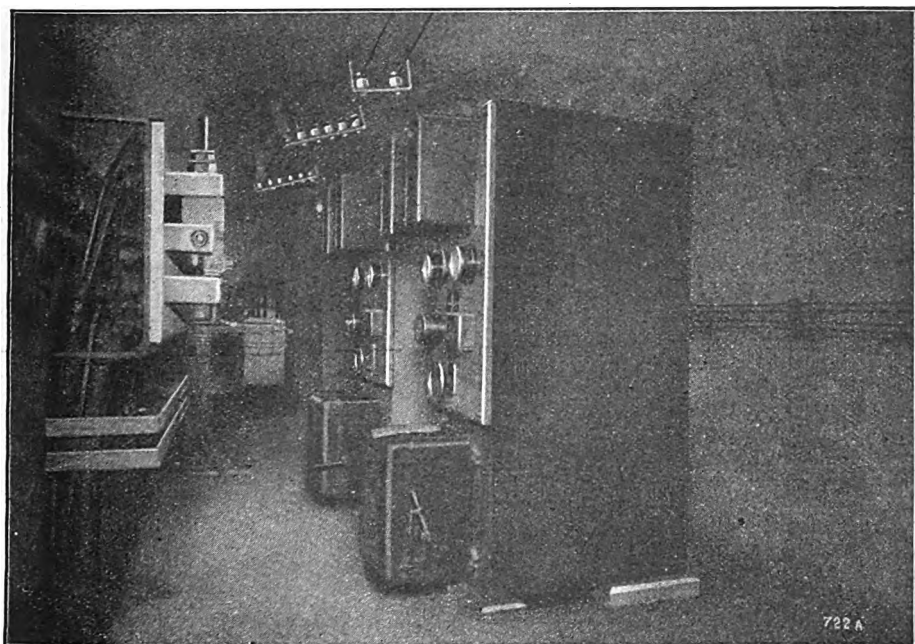


Fig. 7. — Redresseurs Hewittic du poste de charge

Equipements de démarrage

J'ai peu de choses à dire au sujet des contrôleurs qui sont les organes fatiguant le plus du fait des démarrages fréquents que leur impose le service de la traction au fond.

Cependant nous avons essayé un équipement du type à contacteurs sur l'une des locomotives transformées dont j'ai parlé tout à l'heure.

Il fonctionne depuis plus de deux ans sans nécessiter aucune intervention d'entretien. Nous pensons que c'est la solution de l'avenir.

LA FOUDRE GLOBULAIRE (*)

par M. E. MATHIAS

*Correspondant de l'Institut, Directeur de l'Institut et Observatoire de physique
du globe du Puy-de-Dôme.*

§ 1. — **Introduction. Historique.** — Quand une décharge électrique se produit entre un nuage et la terre ou entre deux nuages, l'éclair est le phénomène lumineux, le tonnerre le phénomène sonore, la foudre le phénomène total.

Le phénomène dangereux est l'éclair, qui ne dure qu'un temps très court, mais qui éblouit ; au contraire, le tonnerre, par ses éclats et ses roulements, a terrifié les plus braves à toutes les époques. C'est à lui qu'on a donné de l'importance et c'est pour cela que, dans la pratique, le mot « tonnerre » est généralement synonyme de « foudre ». Il en résulte que les essais d'explication de la foudre sont exclusivement des essais d'explication du tonnerre ; le célèbre mémoire d'Arago « Notice sur le tonnerre » n'échappe pas à cette règle ⁽¹⁾.

Les essais d'explication des anciens n'ont été que des balbutiements. Seul, Sénèque a mis de la clarté dans ses descriptions des phénomènes. De Sénèque à Descartes, la seule idée développée était celle du *briquet à air*. La compression de l'air par le rapprochement subit de deux nuages superposés engendrait à la fois le bruit du tonnerre et assez de chaleur pour enflammer les « exhalaisons » répandues dans l'air. ce qui expliquait l'éclair... Arago a fait justice de ces pauvretés et fait, en passant, la remarque fondamentale que si, dans son trajet, la foudre produit le vide partout où elle passe, le bruit serait la conséquence de la rentrée de l'air dans le vide en vertu de l'expérience du *crève-vessie*, et ce serait l'explication du tonnerre ⁽²⁾.

On peut moderniser ce qui précède en remarquant que le bruit fait par la rentrée de l'air dans le vide s'explique tout aussi bien par

(*) Communication présentée à la séance de la 6^e Section du 2 juillet 1930 et à la séance mensuelle du 8 novembre 1930.

(1) François Arago, *Œuvres complètes*, Notices scientifiques, t. II. Paris, Le grand, Pomey et Creuzet, libraires-éditeurs.

(2) Arago, *loc. cit.*, p. 239.

le phénomène physique (ou mécanique) de claquement du fouet. La *mèche* du fouet est une palette qui, en se déplaçant rapidement parallèlement à elle-même, fait le vide derrière elle : le bruit sec, le claquement que l'on entend, est le résultat de la rentrée de l'air dans le vide, le claquement étant d'autant plus intense que le vide a été plus parfait, la vitesse de la mèche étant plus grande. Le *clac !* du fouet est, à s'y méprendre, le bruit même du tonnerre lorsque, l'éclair étant proche et se produisant dans une grande plaine, ne donne pas naissance à des roulements. A cause de la rentrée de l'air dans le vide, ce que l'on peut appeler le « tonnerre d'Arago » est un *tonnerre centripète*.

Le célèbre philosophe allemand Schopenhauer avait, au contraire, été surtout frappé par le caractère explosif, par le *boum !* de certaines décharges d'éclair, par exemple de celles qui d'un seul coup ramènent à l'état neutre un énorme nuage orageux. Avec beaucoup de modestie, il a proposé, à ce sujet, une théorie du « tonnerre centrifuge ». Il imaginait que la tension électrique (différence de potentiel) des deux nuages entre lesquels doit jaillir l'éclair décompose l'eau, produisant ainsi du *gaz tonnant*, dont les molécules s'accumulent jusqu'à ce que le jaillissement de l'éclair enflamme celles-ci en produisant une détonation, qui est nécessairement un *tonnerre centrifuge*. Les « éclairs de chaleur » et les éclairs sans tonnerre des hautes régions de l'atmosphère seraient des éclairs sans décomposition de vapeur d'eau ; au contraire, les éclairs bruyants auraient toujours une origine chimique ⁽¹⁾.

En réalité, Arago et Schopenhauer ont aperçu chacun une des faces de la question, les tonnerres centripète et centrifuge existant bien dans la réalité.

§ 2. — **Théorie actuelle.** — L'*éclair fulgurant*, ou de première classe, d'Arago, est l'air rendu éblouissant par le passage d'une décharge électrique naturelle. Comme cela résulte des expériences de B. Walter ⁽²⁾, de H. Norinder ⁽³⁾ et du Dr G. Simpson ⁽⁴⁾, il consiste en un

(1) Schopenhauer, Philosophie et Science de la nature, traduction française de A. Diétrich, p. 68, cité par J. Estalella, *Anales de la Sociedad espanola de fisica y quimica*, t. XXIII, p. 186 (avril 1925).

(2) B. Walter, *Phys. Zeitschr.* t. III, p. 168, 1902.

(3) H. Norinder, *Teknisk Tidskrift*, t. 33, p. 190, Stockholm, 1923.

(4) Dr. Simpson, *Proc. Roy. Soc.*, t. 111, A, 1926.

transport non oscillant d'électricité positive d'une région à potentiel élevé V à une région à potentiel V' beaucoup plus bas.

Lorsqu'une décharge électrique naturelle traverse l'air, celui-ci prend un éclat insoutenable, capable de déterminer une cécité temporaire ou définitive. L'intensité énorme des rayons ultra-violets prouve tout au moins la très haute température (2 500° ?) de l'éclair fulgurant. Lorsque la décharge est passée, le *reste d'éclair* n'est pas simplement de l'air chaud, car celui-ci n'est pas sensiblement lumineux. Comme à la place de l'éclair il y avait *avant* de l'air et *après* de l'air encore, il en résulte que le reste d'éclair est nécessairement constitué par les gaz de l'air, tout en n'étant pas de l'air, à proprement parler, puisque le reste d'éclair est très lumineux, tandis que l'air simplement chaud ne l'est pas sensiblement.

Le présent travail consiste à chercher quelle est la nature du reste d'éclair et à montrer les liens intimes qui unissent l'éclair fulgurant linéaire à l'éclair *sphérique* qui en est une forme terminale exceptionnelle.

La première question est résolue dans ses grandes lignes par la *chute du reste d'éclair*, observée par M. Jean Koechlin, le 21 mai 1924, à Bitschwiller (Haut-Rhin).

« Le 21 mai dernier, je me trouvais dans mon jardin à Bitschwiller, vallée de la Thur, vers 18 heures. Le temps était chaud et lourd. J'ai vu un nuage se former dans le ciel bleu au-dessus du village. Il a fini par couvrir la huitième partie environ de la surface du ciel visible entre les montagnes. Ce nuage était donc relativement petit et semblait peu menaçant. Cependant la pluie a commencé à tomber. Je suis alors rentré dans ma maison et me suis mis à une fenêtre, fixant le nuage. Un éclair blanc l'a sillonné se dirigeant vers le sol. L'éclair s'est épaissi, en ralentissant sa descente, est devenu jaune, puis rouge feu. Il a fini par former une grosse boule de feu, laissant derrière elle une traînée d'étincelles rouges. La descente de la boule a continué, très lente, et, à 2 mètres environ du sol, à 50 mètres de ma fenêtre, la boule a éclaté subitement en produisant un coup de tonnerre sec et violent, sans laisser de traces... » (1)

Ainsi donc, l'éclair sphérique final rouge feu est une forme du *reste d'éclair*, qui était primitivement grossièrement linéaire et blanc. Ad-

1) *La Nature*, n° 2623 du 12 juillet 1924, *Supplément*, 2° colonne.

mettons comme température centigrade initiale $t = 9 \times 273^\circ$; alors la densité de l'air à t° par rapport à l'air normal est

$$\frac{1}{1 + \alpha t} = \frac{1}{1 + \frac{1}{273} 9 \times 273} = \frac{1}{10},$$

en admettant $\alpha = \frac{1}{273}$. Et cependant le reste d'éclair tombe ! Il faut donc admettre que, sous l'influence de la très haute température produite et de l'énergie de la décharge, il s'est formé un air condensé dont la molécule-gramme est de l'ordre du décuple de celle de l'oxygène, afin d'obtenir une densité voisine de 1 permettant au reste d'éclair de tomber dans l'air un peu raréfié qui supporte le nuage orageux.

En quoi peut bien consister cet air condensé ? Si on élimine les gaz monoatomiques de l'air de valence nulle, et CO^2 (3 dix-millièmes en volume) et si on remarque que les éclairs peuvent se former là où, à cause de la basse température, la tension de la vapeur d'eau est très faible, on est conduit à penser que le reste d'éclair est un composé oxygéné de l'azote encore inconnu et qui ne se forme qu'à température très élevée

La théorie actuelle consiste à dire que, dans le passage d'une quantité m d'électricité positive naturelle du potentiel V au potentiel $V' < V$, il se forme une combinaison d'oxygène et d'azote avec *condensation* et *absorption de chaleur* aux dépens de l'énergie $m(V - V')$ de la décharge. Appelons *matière fulminante* le corps qui s'est formé, lequel est *endothermique* et *explosif* en vertu des travaux classiques de Marcellin Berthelot. Lorsque la température baisse par refroidissement de la matière fulminante (reste d'éclair), celle-ci devient instable et détone violemment en libérant d'un seul coup l'énergie énorme absorbée lors de sa formation.

Comme cela arrive quand il y a décomposition d'un endothermique par explosion, la matière fulminante se réduit en ses éléments, qui sont ceux de l'air, *sans trace de composés intermédiaires* (Berthelot), ce qui est bien conforme à toutes les observations.

Remarque. — La chute visible de la matière fulminante, qui est un phénomène réel, nécessaire, en ce qui concerne l'observation oculaire est cependant un phénomène exceptionnel. Il est probablement moins rare qu'on ne pense ; mais, comme on ne s'y attend pas et qu'il n'y

a pas dans le ciel de points de repère ⁽¹⁾, le déplacement de l'éclair linéaire ne se voit pas.

La chute directe de l'éclair fulgurant sensiblement horizontal se voit donc exceptionnellement ; on doit à l'observateur d'élite qu'était le professeur Galli, la très curieuse relation suivante :

« L'orage du 9 septembre 1877, qui, à Castelgandolfo, produisit le globe fumeux qui explosa, envahit Velletri une demi-heure plus tard... L'air était très agité ; dans le tube du baromètre, le mercure s'agitait comme si l'instrument était secoué volontairement. Les éclairs, presque tous en zigzag, avaient une forte couleur pourpre, et je notai avec étonnement que le sillon lumineux, un peu affaibli, restait en l'air pendant une couple de secondes. Différentes personnes virent toutes le même phénomène et vinrent m'en demander l'explication, que je



Fig. 1.

ne pouvais donner. Il a été ensuite observé et décrit aussi par Pockell, par Liais, par Prinz et par Touchet, lequel exclut l'hypothèse de décharges successives et incline à croire à un effet de phosphorescence ou d'incandescence (*La Nature*, 1904). Mais un de ces éclairs me présenta une particularité encore plus difficile à expliquer, et peut-être très rare, parce que je ne la vois expliquée par personne. C'était un éclair légèrement ondulé et presque horizontal, également de couleur pourpre, lequel resta ainsi dessiné pendant deux ou trois secondes. Après, il s'abaissa tout ensemble d'environ 5° , en se maintenant parallèle à la position primitive et en conservant presque exactement les mêmes ondulations.

« Je fermai les yeux craignant une illusion ; le ruban lumineux, moins vif que le premier, resta à sa nouvelle place et après disparut instantanément. La figure 1 est prise d'après une esquisse que je fis, à peine l'orage passé. Ce fait, dont je ne puis nullement douter, échappe à l'hypothèse de la phosphorescence, et laisse plutôt supposer qu'une

(1) Dans le jour, on ne voit pas les étoiles, et la nuit, en temps d'orage, le ciel est couvert par les nuages.

grande quantité de particules matérielles, incandescentes ou brûlantes, sont descendues suivant des lignes verticales par une raréfaction instantanée de la couche aérienne qui les soutenait. » (2)

§ 3. — **Phénomènes sonores.** — La théorie précédente montre que le phénomène sonore du *tonnerre* est nécessairement consécutif au phénomène lumineux de l'éclair fulgurant. Laissons de côté la question des roulements du tonnerre qui ne nous intéresse pas. Il y a deux phénomènes consécutifs à la décharge :

1° une condensation, proportionnelle à la quantité de matière fulminante formée, cette combinaison se formant avec contraction des composants ;

2° la décomposition spontanée ultérieure de la matière fulminante dès que sa température s'abaisse au-dessous de celle à laquelle peut exister, sous la pression atmosphérique, ce corps fortement endothermique.

Le vide produit par la condensation est immédiatement comblé par l'air atmosphérique, d'où production d'un bruit que nous appelons le *tonnerre centripète d'Arago*, la décomposition exothermique de la matière fulminante produisant à son tour le *tonnerre centrifuge de Schopenhauer*. Dans le cas de l'éclair fulgurant linéaire, les deux tonnerres, séparés par un très court espace de temps, se confondent pour l'oreille en un seul. Dans le cas de l'éclair sphérique, au contraire, il y a dissociation des deux bruits de l'éclair, qui peuvent être séparés par un grand nombre de secondes, le tonnerre centrifuge pouvant même disparaître sensiblement lorsque la matière fulminante fuse au lieu d'exploser.

§ 4. — **Transformation de l'éclair fulgurant linéaire en éclair sphérique.** — L'agent de transformation, qui permet de passer de l'éclair fulgurant initial plus ou moins sinueux à l'éclair sphérique, est la *tension superficielle* de la matière fulminante, laquelle agit en rétractant la surface extérieure de ce corps endothermique, le refroidissement étant d'autant plus lent, toutes choses égales d'ailleurs, que la quantité de matière fulminante formée est plus considérable. Avec

(2) Ignazio Galli, Della protezione offerta dai parafulmini e di alcuni quesiti sulla natura del fulmine, § 33, p. 40-41 (Estratto dalle *Memorie della Pontificia Accademia Romana dei Nuovi Lincei*, t. 26, 1908).

un éclair fulgurant cylindrique, de longueur l et de rayon r , la surface $\frac{2\pi r l}{\pi r^2 l} = \frac{2}{r}$ de l'unité de volume est grande, car r est très petit, et la différence de température 2500° entre la matière fulminante et l'air extérieur est énorme ; le refroidissement est instantané et de l'ordre de 1 centième de seconde.

Supposons maintenant une décharge d'une excessive violence donnant naissance à une très grande quantité de matière fulminante et se produisant très près de la surface de la terre, vers 100 mètres d'altitude, ce qui arrive quand les orages sont d'une très grande intensité et desquels on dit que *les nuages sont très bas*. Un éclair vertical, entre le nuage et la terre, est alors très court et de section relativement grande. La matière fulminante se refroidit plus lentement, raccourcissant sa longueur et augmentant sa section constamment. Le refroidissement, rapide au commencement, diminue très vite en tendant vers un minimum correspondant à la *surface minima sphérique* de la matière fulminante. La surface de l'unité de volume devenue des centaines de fois plus petite qu'auparavant, le refroidissement dure des centaines de fois plus et devient de l'ordre de plusieurs secondes.

Etude particulière de l'éclair sphérique

§ 5. — **Définitions.** — La matière fulminante étant la substance encore inconnue qui forme le reste d'éclair, nous appellerons dorénavant *foudre toute agglomération de matière fulminante*. Nous allons étudier les propriétés de celle-ci lorsqu'elle affecte la forme sphérique et essayer de montrer que, *lorsqu'elle est pure, elle jouit toujours, toutes choses égales d'ailleurs, des mêmes propriétés et se retrouve la même à toutes les époques et dans tous les pays*.

Nous préciserons par la suite les conditions de pureté de cette substance.

§ 6. — **Principales apparences.** — Les éclairs sphériques peuvent avoir des volumes extrêmement différents, et varier depuis les dimensions de sphères de 2 mètres de diamètre et plus jusqu'aux dimensions d'un pois. Admettons, comme un fait d'expérience, que, le plus souvent, les globes fulminants puissent flotter dans l'air à quelques mètres du sol. Tantôt le globe flotte librement dans l'air sans manifester aucune tendance à se mouvoir de lui-même. Tantôt, au contraire, il

se meut lentement¹, ou rapidement. Chose étrange entre toutes, certains éclairs sphériques ont une marche hésitante, constamment changeante, comme s'ils cherchaient leur voie ; d'autres fois, on voit un globe, immobile quelque temps, prendre brusquement sa course dans une direction, ou bien, au contraire, s'arrêter brusquement et partir dans une autre direction, ou revenir sur ses pas.

Les mouvements qui précèdent sont des mouvements de translation ; or certains globes sont animés d'un mouvement de rotation sur eux-mêmes, tantôt lent et tantôt rapide, et ce mouvement peut s'accompagner d'un mouvement de translation.

Généralement la courte existence des globes se termine par une explosion très violente ; quelquefois, au contraire, ils fusent et disparaissent sans bruit sensible.

Enfin, la forme véritablement sphérique est elle-même exceptionnelle, parce que, fût-elle réalisée à l'état de repos du globe fulminant, que l'état de mouvement ovalise la surface extérieure de celui-ci différemment suivant la vitesse et les particularités du mouvement et de l'impureté de la substance. En pareil cas, on a coutume de parler de la *foudre globulaire*, expression qui a l'avantage de ne pas préciser la forme extérieure de celle-ci (sphère, ellipsoïde, œuf, etc.).

§ 7. — **Première théorie.** — L'idée la plus simple est de supposer l'éclair sphérique formé de couches sphériques, isothermes et concentriques, la température diminuant d'une manière continue depuis le centre jusqu'à la périphérie.

Chaque abaissement de la température de la couche superficielle, supposée à la limite de la stabilité, exige la destruction d'un certain nombre de molécules de la matière fulminante. La surface de l'unité de volume étant $\frac{4 \pi R^2}{\frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{3}{R}$, est beaucoup plus petite pour les grosses sphères que pour les petites ; il s'ensuit que, toutes choses égales d'ailleurs, le refroidissement des grosses sphères est beaucoup plus lent que celui des petites. On comprend donc que les éclairs en boule de petit rayon puissent disparaître, par une sorte d'évaporation de plus en plus rapide à mesure que R tend vers zéro, sans faire de bruit appréciable.

Au contraire, pour les grosses sphères, la décomposition des molécules de la surface ne peut pas suffire à assurer le refroidissement progressif de la matière fulminante. Celle-ci, étant incandescente, est

bonne conductrice de la chaleur ; la température intérieure, tout le long d'un rayon, varie lentement du centre à la périphérie ; lorsque la périphérie arrive à la température de décomposition de la matière fulminante sous la pression atmosphérique, le centre de la sphère en est lui-même peu éloigné. Il en résulte que toutes les couches concentriques explosent en même temps, soit sous l'influence du refroidissement périphérique, soit, quand elles sont dans l'intérieur, sous l'influence du choc produit par l'explosion des couches plus extérieures.

Pour les sphères de petit rayon, dont le refroidissement est beaucoup plus rapide, il y a une grande différence de température, tout le long du rayon, entre le centre et la périphérie. Dès lors, la matière fulminante superficielle, se décomposant brusquement, n'ébranle pas sensiblement les couches concentriques voisines, *qui sont plus stables parce qu'elles sont nettement plus chaudes*, et la décomposition est progressive au lieu d'être presque simultanée en tous les points.

§ 8. — **Exceptions à l'explication précédente.** — La réalité est beaucoup plus compliquée que nous ne l'avons supposé. Tandis que de très petites sphères explosent, certains gros globes disparaissent presque sans bruit ; d'autres fois, ils ont des éclatements partiels, plusieurs fois répétés au cours desquels ils expulsent de leur sein, avec une très grande vitesse, des masses variables de matières incandescentes. La persistance des impressions lumineuses sur la rétine donne à ces projections l'apparence de *fusées*, ou d'*éclairs*, ou de *langues de feu*, le contact des matières lancées avec les corps vivants (hommes ou animaux) donnant des secousses électriques d'intensité variée allant de l'électrocution à la secousse bénigne.

Certains globes ont un *appendice caudal* de forme variée, lumineux ou fumeux, simple ou multiple.

L'explication de tous ces faits et de beaucoup d'autres que nous n'avons pas mentionnés exige l'abandon de l'hypothèse première de la *parfaite stratification* de la matière fulminante en couches sphériques, isothermes et concentriques, dans lesquelles la température diminue d'une manière continue du centre à la périphérie. D'ailleurs, le mode même de génération des foudres conduit à une grande hétérogénéité dans les températures des divers points de la masse incandescente gazeuse. La température initiale très élevée et la forme toute en surface de l'éclair fulgurant filiforme générateur déterminent aus-

sitôt un refroidissement énorme ; le *volume diminue* parce que la température baisse, et la *forme change* parce que la tension superficielle augmentant toujours, rétracte la surface libre, qui tend vers l'aire minima.

Les éléments de la surface libre rentrant à l'intérieur de la matière fulminante, celle-ci devient hétérogène, comme résultant du mélange de particules intérieures très chaudes avec des particules plus ou moins extérieures refroidies à des degrés divers.

La matière fulminante, combinaison des éléments de l'air, est un *électrolyte*, particulièrement quand elle a dissous dans l'air des impuretés ; sa conductibilité, calorifique ou électrique, *doit donc être une fonction croissante de la température* (1). A l'état incandescent, la matière fulminante doit donc conduire d'autant mieux la chaleur que sa température est plus élevée. Comment, dès lors, parler d'*hétérogénéités thermiques* dans l'intérieur de la matière incandescente si les parties froides se réchauffent au contact des parties chaudes ?

Pour les foudres à *forme plate*, l'hétérogénéité de la matière est visible par transparence ; c'est le cas de la figure 2. Pour les formes épaisses, l'hétérogénéité de la surface extérieure sera montrée dans la suite § 12. Pour ce qui est des parties profondes, il faut admettre, à l'exemple de certaines poudres, que la matière fulminante qui, par refroidissement extérieur, a commencé à se décomposer, en rentrant dans l'intérieur où elle se réchauffe, *ne retrouve plus sa stabilité première*. S'il en est ainsi, l'hétérogénéité de la matière fulminante à l'intérieur même de la masse incandescente est une réalité.

§ 9. — **Hétérogénéités thermiques** — La matière fulminante, supposée *pure* en tous ses points, sera dite *parfaitement stratifiée* si elle est formée de couches sphériques, isothermes et concentriques, la température diminuant d'une façon continue du centre à la périphérie. Toute exception à cette règle sera appelée *hétérogénéité thermique*. Celles dont il va être question sont produites par des masses plus froides que les couches sphériques, isothermes et concentriques, qu'elles

1) Nous avons déjà, au § 7, rencontré cette hypothèse nécessaire, qui permet de rendre compte de bien des faits.

rencontrent. On peut faire plusieurs hypothèses simples sur la loi de répartition de ces masses froides.

Si l'on imagine un *amas cylindrique ou conique, de révolution autour d'un rayon, cet amas aboutissant à la surface extérieure*, on explique les *appendices caudaux*. Le globe se meut alors comme un vase à réaction, l'appendice caudal étant nécessairement dirigé en sens contraire du mouvement de translation.

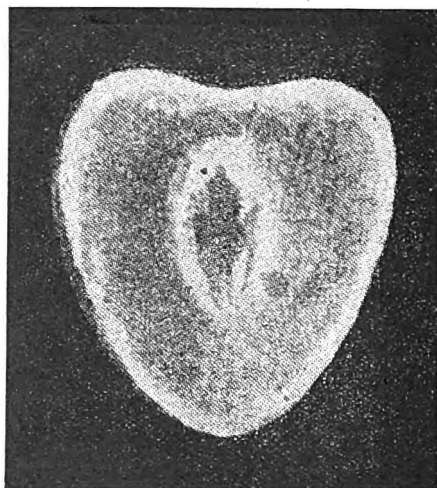


Fig. 2.

On explique aussi facilement l'explosion des globes et soit leur séparation en deux ou plusieurs morceaux, soit l'éparpillement de la substance sous la forme d'un *bouquet de fusées* qui s'évanouit dans un nuage d'étincelles ou de fumée.

§ 10. — *Etude de la matière fulminante.* — L'étude de l'éclair sphérique et de ses diverses propriétés mécaniques, physiques et chimiques, se confond désormais avec l'étude des propriétés mécaniques, physiques et chimiques de la matière fulminante, corps inconnu jusqu'ici, mais dont les propriétés n'ont rien de mystérieux puisqu'elles obéissent à toutes les lois connues.

Notre première remarque sera celle-ci : le reste d'éclair est une formation endothermique ; il est donc favorisé par des températures

élevées et surtout fort gêné par des températures très basses, qui ne conviennent qu'à des formations exothermiques. Conséquence : dans les régions polaires, il ne doit pas y avoir d'éclairs fulgurants, tandis que sous l'équateur, ils doivent être incessants. Dans les latitudes moyennes, il doit y avoir d'autant moins d'éclairs en hiver que la latitude est plus élevée, le maximum se produisant à l'époque de la canicule.

La fréquence saisonnière des foudres globulaires, d'après les statistiques dressées par Sestier et le professeur Galli, vérifie les prévisions de la thermodynamique. D'autre part, la disparition presque totale de l'éclair fulgurant, et par suite du tonnerre, dans les hautes latitudes à partir de 70°, par exemple) est un fait bien établi, pour les régions arctiques tout au moins.

§ 11. — **Couleur de la matière fulminante pure.** — Si une foudre sphérique est née d'un éclair fulgurant linéaire qui a éclaté, s'est transformé et est tombé dans un air sans corps fixe ou organique en suspension, alors *la matière fulminante est pure*. Si un observateur est, comme M. Jean Kœchlin, de Bitschwiller, assez favorisé pour assister à toutes les phases du développement d'une telle foudre, *il voit la succession des couleurs du corps noir qui se refroidit*, la matière fulminante n'atteignant la forme sphérique ou quasi-sphérique que quand la température superficielle est suffisamment basse (vers les $\frac{2}{3}$ du temps de la chute d'après une observation). Les foudres pures n'ont pratiquement que trois couleurs en dehors du blanc : jaune, orangé ou rouge, avec des teintes de passage jusqu'au rouge sombre. Au point de vue de la fréquence, les foudres jaunes sont rares, les globes orangés assez fréquents, les globes rouges les plus fréquents, à cause du temps mis par la matière fulminante pour arriver à l'aire minima.

§ 12. -- **Statistique du Professeur Galli.** — L'apparition des foudres sphériques étant fortuite, le plus souvent elle passe inaperçue. Quand, par hasard, un observateur en voit une, il note sa couleur à ce moment, les changements de teinte étant généralement insensibles en quelques secondes. Une statistique du professeur Galli, portant sur 81 cas de foudres sphériques ou à contour défini, peut se mettre sous la forme suivante :

Couleurs du refroidissement du corps noir, simples ou doubles	47 cas
Autres couleurs, simples ou doubles	20 —
Couleurs variées (non indiquées)	4 —
Couleur noire	6 —
Couleur blanche sans lumière propre	4 —

Il y a 9 cas sur 81 pour lesquels la couleur du globe n'est pas unique ; ces singularités colorées se résument ainsi :

1. vert avec des zones rouges et jaunes	1 cas
2. orangé avec des taches rouges	1 —
3. rouge et blanc	1 —
4. jaune et blanc	1 —
5. bleu et blanc	1 —
6. couleurs variées (non explicitées)	4 —

La différence de couleur précise les *hétérogénéités thermiques* de la surface, dont il a été question au § 8 et qui sont ainsi prises sur le fait. Dans le cas 2, les taches rouges sont plus froides que la matière orangée ; dans les cas 3 et 4, le rouge et le jaune sont respectivement plus froids que le blanc ; dans les cas 1 et 6, l'hétérogénéité thermique est plus compliquée.

Les couleurs du refroidissement du corps noir, qui d'après le premier tableau se présentent 47 fois sur 81 cas, soit sensiblement une fréquence de 58 pour cent, *correspondent à une matière fulminante pure, à la surface tout au moins !*

Etudions maintenant les 20 cas de couleurs, simples ou multiples, autres que celles du refroidissement du corps noir, et autres que le noir et le blanc sans lumière propre ; ils se décomposent ainsi :

1. Couleur bleue	12 cas
2. Couleur verte	4 —
3. Couleur violette	2 —
4. Couleur rouge, puis bleue	1 —
5. Couleur blanche et bleue	1 —

Si l'on remarque que le vert et le violet résultent respectivement de la superposition au bleu du jaune et du rouge, on voit que les 20 cas du tableau précédent concernent *la couleur bleue seule ou superposée aux couleurs du refroidissement du corps noir.*

Quel est donc le corps qui apporte la couleur bleue, nécessaire pour rendre compte de certaines teintes ? On peut hésiter entre l'ozone et

le *soufre*. La persistance pendant des journées entières de l'odeur sulfureuse sur le passage de la foudre, comme aussi la présence sûrement constatée des sulfures de fer, de cuivre et d'or, ne permet pas de conserver l'hypothèse de l'ozone, corps très instable.

Remarque. — La superposition de certaines couleurs, dont il est question dans ce paragraphe, doit être entendue dans le sens subjectif et non dans le sens objectif. Il s'agit, dans la réalité, non d'une superposition, mais d'une *juxtaposition des couleurs en question*. Celles-ci se produisent en des points extrêmement voisins ; les droites qui joignent ces points au centre optique de l'œil sont pratiquement parallèles et vont converger en un même point de la rétine, où il y a, mais à ce moment seulement, superposition des couleurs des points voisins diversement colorés. *La superposition a lieu sur la rétine, tandis que la réalité consiste dans une juxtaposition.*

§ 13. — **Odeur de la foudre.** — Certaines foudres n'ont pas d'odeur. Lorsqu'elles en ont, les témoins s'accordent pour assimiler l'odeur à celle du *soufre brûlé* (SO^2) ou de *poudre brûlée* ou pour parler d'odeur nauséabonde (H^2S).

La conclusion est que *la matière fulminante pure n'a pas d'odeur sensible*, celle-ci étant liée à la présence du soufre, donc à la présence de la lumière bleue dans certaines foudres bleues, vertes ou violettes.

§ 14. — **Globes noirs et blancs sans lumière propre.** — Dans les cas précédents, il s'agissait de *foudres nues*, dont on voyait directement la substance incandescente. Maintenant, il s'agit de *foudres habillées*, dont le vêtement noir, gris ou blanc est *collant* ou *flottant*. Si le vêtement est collant, les foudres sont des sphères noires, grises ou blanches ; si le vêtement est flottant, la foudre est un *petit nuage* noir, gris ou blanc, masquant la masse ignée intérieure.

Avec les foudres noires, le vêtement est si épais ou si absorbant qu'il ne laisse rien percer de la lumière intérieure, sauf quand elles éclatent.

Avec les foudres grises ou blanches, le vêtement collant peut être assez mince ou assez transparent pour transmettre partiellement la lumière intérieure ; si le vêtement collant est troué par endroits, les déchirures laissent entrevoir la matière fulminante incandescente.

Pour le professeur Galli, les cas actuels diffèrent totalement de ceux des foudres nues, la matière fulminante étant ici, pour lui, un *amas*

de nuages noirs, gris ou blancs ⁽¹⁾. Pour nous, au contraire, la matière fulminante, à des impuretés près, est toujours la même ; seulement, elle est ici cachée à nos yeux par un rideau de nuages, collant ou flottant, mince ou épais, de couleur noire, grise ou blanche.

Avant tout, il doit y avoir unité d'explication comme il y a unité de matière fulminante pure. On sait que souvent, et surtout en temps d'orage, l'air est agité à des hauteurs considérables et peut tenir en suspension des matières fixes (cendres vomies par les volcans ou poussières transportées par le vent) et des matières végétales ou animales (pollen, graines, spores, animalcules). Or, les matières protéiques, qui constituent essentiellement le protoplasma de tous les êtres vivants, contiennent de 0,2 à 2,4 0/0 de soufre, proportions certainement inférieures à la réalité, d'après une *Note* récente de M. Gabriel Bertrand.

D'autre part, les parties solides des tissus organisés (*cellulose*) sont des hydrates de carbone avec, en général, des traces de sels minéraux. La calcination des tissus organisés donne de la vapeur d'eau et du noir de fumée. Trois cas sont possibles : ou bien il y a prédominance énorme du noir de fumée, ou bien il y a des proportions comparables de noir de fumée et de vapeur d'eau ; ou bien il y a une large prédominance de vapeur d'eau.

Dans le premier cas et, *en supposant le vêtement flottant*, la matière fulminante émettra un nuage noir qui la cache aux observateurs ; dans le deuxième cas, le nuage enveloppant est gris ; dans le troisième cas, le nuage est blanc. Pour légitimer cette explication, il suffit de se rappeler que, quand la fumée d'un vaisseau est noire, il suffit d'envoyer dans la cheminée de la vapeur d'eau pour voir, en quelques secondes, la fumée devenir grise, puis blanche.

On verra par la suite la distinction entre le vêtement flottant et le vêtement collant, qui fait intervenir la pression électrostatique et les propriétés capillaires de la surface extérieure des globes fulminants.

§ 15. — **Application du principe du déplacement de l'équilibre aux foudres.** — Quand une décharge d'électricité naturelle traverse l'air et l'échauffe, les lois du déplacement de l'équilibre imposent à la combinaison qui se forme (matière fulminante) d'être endothermique à la température t de sa formation. Lorsque la température baisse par

(1) I. Galli, I principali caratteri dei fulmini globulari, § 29, p. 54. (Estratto dalle *Memorie della Pontifica Accademia Romana dei Nuovi Lincei*, t. XXVIII, 1930).

refroidissement de cette substance, le déplacement de l'équilibre exige une réaction exothermique *immédiate* consistant dans la décomposition spontanée d'une partie de la matière fulminante. Celle-ci se dissocie donc à mesure que la température baisse et de plus en plus, la tension de dissociation croissant quand la température baisse et diminuant quand la température monte.

Inversement, une diminution de pression à la surface de la matière fulminante fera remonter la température de celle-ci ; au contraire, une augmentation de pression fera baisser la température.

Quand la température est assez basse pour que la tension de dissociation égale la pression atmosphérique, la matière fulminante se résout spontanément en ses éléments, *qui sont ceux de l'air* ; si elle est pure, cette décomposition se fait sans production de vapeur d'eau, ni dépôt de noir de fumée. Si la matière fulminante est impure par absorption de corpuscules végétaux ou animaux, sa décomposition donnera lieu à de la vapeur d'eau et à des étincelles constituées par des particules de noir de fumée incandescentes. Enfin, des gaz sulfurés (SO^2 et H^2S) seront mêlés à la vapeur d'eau.

Si la décomposition, devenue de plus en plus rapide, est gênée par un obstacle, elle affecte alors la forme explosive, par analogie avec ce qui se passe dans les pièces d'artifice dégageant un très grand volume de gaz. Lorsque ceux-ci peuvent s'écouler sans difficulté, le mélange brûle très rapidement *en fusant*, sans faire de bruit sensible. Si un obstacle, même très léger, gêne l'écoulement des gaz produits, l'augmentation subite de pression qui en résulte, lorsque la vitesse de combustion est très grande, détermine *l'explosion du mélange*.

Lorsqu'une foudre globulaire est électrisée, la pression électrostatique, proportionnelle au carré du potentiel qui en résulte, étant dirigée vers l'extérieur, diminue d'autant la pression extérieure, donc en vertu de ce qu'on a vu plus haut, fait remonter la température. L'électrisation des foudres globulaires est donc un élément de stabilité d'autant plus grand que leur potentiel est plus élevé.

§ 16. — Recherche d'une valeur approchée de l'énergie interne de la matière fulminante par centimètre cube et par gramme. — Bien que les observations ne contiennent à peu près jamais d'indications numériques précises, il n'est pas impossible d'en tirer une valeur approchée de l'énergie interne de la matière fulminante à la température de sa décomposition. Nous emploierons, à cet effet, deux

méthodes différentes, appliquées à des formes pour ainsi dire inverses. L'une d'elles sera l'*éclair fulgurant descendant*, dans des conditions de violence telles que le fer traversé par la décharge commencerait à fondre ; l'autre forme sera un *éclair sphérique ascendant minuscule, inoffensif*. Si les deux méthodes conduisent au même résultat, on sera bien près de la certitude et le principe posé de l'unité de la matière fulminante pure sera confirmé.

Première méthode. — Soit un éclair fulgurant rectiligne, cylindrique, de longueur l , de section S , éclatant entre deux régions de potentiels respectifs V et V' , en volts, avec $V > V'$, la décharge d'énergie W transportant m coulombs. On a :

$$W = m(V - V') = ml \frac{V - V'}{l} = m l G$$

G est le gradient de potentiel en volts par mètre, l s'exprimant en mètres et W en joules. Soit ω l'énergie interne par unité de volume de la matière fulminante,

$$\omega = \frac{W}{lS} = \frac{m l G}{lS} = \frac{m}{S} G.$$

La valeur de ω dépend uniquement du gradient de potentiel et de la densité de la décharge par unité de surface. Elle est indépendante de la longueur de l'éclair et du régime de la décharge. En particulier, on n'a pas à connaître la durée de l'éclair, d'une mesure difficile.

En prenant pour G , m et S des valeurs expérimentales acceptables, nous aurons l'ordre de grandeur de ω .

Les recherches récentes de C. T. R. WILSON sur l'électricité atmosphérique ⁽¹⁾ conduisent à des valeurs extrêmes de 10 et 50 coulombs pour la charge m transportée par un éclair fulgurant moyen ; nous admettrons la valeur moyenne $m = 30$ coulombs. Pour une durée de $\frac{1}{700}$ de seconde, l'éclair équivaldrait à un courant constant de 21.000 ampères circulant pendant ce temps.

Le potentiel maximum du nuage étant de l'ordre de 10^9 volts, pour un éclair de 2 kilomètres de long, le gradient de potentiel est de 500 kilovolts par mètre.

(1) *Phil. Trans. A*, t. 221, p. 73, 1920. Cité par B. Chauveau, *Electricité atmosphérique*, 2^e fascicule, p. 241 et suivantes.

D'autre part, les recherches faites en Amérique donnent pour G des gradients qui atteignent souvent 2 500 kilovolts par mètre ; nous adopterons la valeur intermédiaire $G=800$ kilovolts par mètre qui s'éloigne peu de celle de C. T. R. Wilson.

Quant à la section S de l'éclair, c'est un élément fort mal connu. B. WALTER, qui a exprimé sur ce sujet l'opinion la plus raisonnable, estime la largeur de l'éclair, supposé être un cylindre circulaire, à quelques centimètres au plus. En prenant $S=10 \text{ cm}^2 = \pi \frac{D^2}{4}$, il vient $D=3,57 \text{ cm}$; on a donc ainsi pour le diamètre transversal d'un fort éclair fulgurant une valeur tout à fait acceptable.

Les valeurs de m , G et S , justifiées par ce qui précède conduisent à

$$\omega = 2,4 \times 10^3 \frac{\text{kgm}}{\text{cm}^3}.$$

Dans le calcul précédent, on admet que le volume de l'éclair est celui de la matière fulminante créée ; comme il y a contraction, l'erreur commise est par défaut. Or, on calcule ainsi l'énergie *initiale* au lieu de la valeur *finale* au moment de l'éclatement ; on commet donc une erreur par excès. Le calcul précédent, outre les incertitudes des nombres relatifs à l'éclair, comporte deux erreurs importantes de signe contraire. Se compensent-elles ? C'est ce que montre le second calcul.

Seconde méthode. — Elle repose sur l'observation suivante. M. Lohier fils, avocat au parlement de Bretagne, écrivit à Réaumur ⁽¹⁾ que, le 14 septembre 1746, vers 7 h. 30 du soir, étant à Rennes avec deux de ses amis, dans son cabinet, il aperçut subitement, sur la partie de sa robe de chambre répondant à la poitrine, trente ou trente-cinq corpuscules lumineux, ayant l'éclat vif et blanc de l'éclair, avec une nuance très légère de rouge ; ces corpuscules étaient pour la plupart globuleux, les plus petits de la grosseur d'un pois et les plus gros de celle du bout du petit doigt. On voyait parmi ces globules six à sept corpuscules qui paraissaient cylindriques, de la longueur d'environ un pouce ou un pouce et demi, et de l'épaisseur de deux lignes ; ces corps longs paraissaient descendre vers le bas de la robe de chambre, par un mouvement semblable à la démarche non accélérée d'un

(1) *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, 1746, p. 23. — Cité par Galli. *Effetti dei fulmini globulari sull'uomo*, etc. § 10 p. 17 (Estratt dalle *Mém. d. Pont. Acc. Rom. d. N. Lincei*, t. 32, 1914.)

ver, et celui qui fit le plus de chemin parcourut environ 15 à 18 lignes : à l'égard des corpuscules, ils ne paraissaient avoir aucun mouvement de translation. M. Lohier crut seulement y en remarquer un de rotation. A la lueur de ces corps lumineux, on pouvait lire aisément de l'écriture, et distinguer les deux couleurs de la robe de chambre... Ils ne durèrent pas bien longtemps : au bout de 5 à 6 minutes ils s'étaient tous éteints et successivement.

Fixés à l'extrémité des fils de la robe de chambre de M. Lohier fils, sans mouvement sensible, les corpuscules sphériques s'évaporent par rayonnement entre leur température centigrade t et la température centigrade t' de l'air environnant. C'est pourquoi ils durent si longtemps. Admettons que les sphères de 4 mm de diamètre ($R = \frac{1}{5}$ cm) ont duré 5 minutes ($\tau = 300$ secondes).

Bien que toutes les particularités du phénomène aient été minutieusement décrites par M. Lohier fils, *il n'est pas question d'un changement de couleur des corpuscules lumineux avant de disparaître* ; donc $t - t' = C^{\circ}$; donc $t = C^{\circ}$.

Nous admettrons donc que l'énergie interne libérée par une diminution ΔR du rayon dans le temps $\Delta \tau$ compense exactement la chaleur perdue par rayonnement dans le même temps.

Soient $\Theta = 273 + t$ et $\Theta' = 273 + t'$ les températures absolues de la matière fulminante considérée comme un corps noir et de l'air, et σ une constante relative à un centimètre carré de la surface rayonnante ; la loi de Stefan donne, J étant l'équivalent mécanique de la calorie :

$$4 \pi R^2 \sigma (\Theta^4 - \Theta'^4) \Delta \tau = 4 \pi R^2 \Delta R \cdot \frac{\omega}{J}$$

$$\frac{\Delta R}{\Delta \tau} = \frac{J}{\omega} \sigma (\Theta^4 - \Theta'^4) = C^{\circ} = \frac{R}{300}$$

$$\omega = \frac{300}{R} J = (\Theta^4 - \Theta'^4) \frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$$

Or Θ'^4 est négligeable devant Θ^4 ; $J = 4,2 \times 10^7$ ergs = 4,2 joules

$$\sigma = 1,56 \times 10^{-12} (1) \quad R = \frac{1}{5} \quad \Theta = 273 + 1027^{\circ} = 1300^{\circ}$$

d'où

$$\omega = 2.86 \times 10^3 \frac{\text{kgm}}{\text{cm}^3}$$

(1) Abraham et Sacerdote, Recueil de constantes physiques, tableau 215. σ est donné par les expériences de Féry et Drecq (1911). Paris, Gauthier-Villars, 1913.

Le calcul précédent, très simple, n'introduit que des grandeurs physiques nettes. La seule difficulté est le choix d'une valeur acceptable pour θ .

L'identité très approchée des résultats numériques fournis par les deux méthodes employées permet de conclure que *l'énergie interne de la matière fulminante pure par centimètre cube, au moment de sa destruction, est d'environ 2830 kilogrammètres* ⁽¹⁾.

Remarque. — Ce nombre comporte deux vérifications. L'observation montre, en effet, que les foudres sphériques d'un rayon de 2 centimètres ont déjà une puissance destructrice considérable, tandis qu'on peut écraser sous le pied, avec quelque précaution, des foudres de la grosseur d'un pois (observation de Sotteville).

Pour $R=2$ cm, $W=95\,840$ kilogrammètres ; la foudre peut lancer à 95 m 84 de hauteur un poids d'une tonne, ce qui rend compte des faits observés.

Pour $R=0,2$ cm, $W=95,8$ kilogrammètres, si la foudre se décomposait d'un seul coup, cette énergie serait encore sensible ; mais si, en marchant dessus, la pression est progressive, la fraction d'énergie libérée à chaque instant ne saurait être très dangereuse.

Calcul de l'énergie interne Ω de la matière fulminante par gramme.

— La matière fulminante ayant sensiblement la densité de l'air, 1 centimètre cube pèse 1,3 milligrammes ; donc 1 milligramme a une énergie de $\frac{2860}{13} = 2200$ kilogrammètres.

$$\text{Donc : } \Omega = 2200 \times 10^3 \text{ kilogrammètres} = \frac{2200 \times 10^3}{427,8} \text{ Calories.} \\ = 5143 \text{ Calories.}$$

La nitroglycérine, réputée la plus énergique des substances explosives, ne dégage par gramme que 1320 Calories ⁽²⁾. *L'énergie interne par gramme de la matière fulminante pure est donc environ quatre fois celle de la nitroglycérine.*

(1) On n'utilise que les observations faites sur les corpuscules sphériques. Les corpuscules cylindriques, beaucoup plus gros, ont montré, à cause de cela, à un degré faible mais très net, le phénomène de la chute de la matière fulminante dans l'air, retardée par le frottement antagoniste des fils de la robe de chambre de M. Lohier fils.

(2) Marcelin Berthelot, Sur la force de la poudre et des matières explosives, p. 100 et 190. Paris, Gauthier-Villars, 1872.

§ 17. — Existence objective de la foudre globulaire. — Pendant longtemps on a désespéré de pouvoir prendre sur le fait l'éclair en boule, dont plusieurs grands physiciens ont nié l'existence. La figure 3 montre une photographie instantanée de ce phénomène obtenue dans la soirée du 17 juillet de l'été de 1892. « Cette photographie a été prise par M. Dunn, de Newcastle-on-Tyne, d'une fenêtre de sa résidence de Westermoreland Road qui domine la vallée de la Tyne.

Un orage s'était déchaîné sur la ville et le globe de feu apparut soudain sur la rivière, marchant à la vitesse d'un homme au pas de

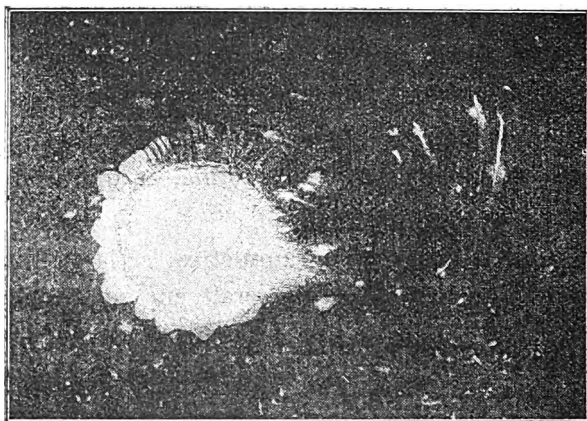


Fig. 3.

course. Il semblait avoir 0 m. 60 de diamètre, et lorsqu'il arriva juste en face de la maison, il s'évanouit. M. Dunn avait eu le temps de prévenir son fils, qui avait glissé une plaque sensible dans une chambre noire et put prendre l'image du phénomène. Les taches reproduites par notre gravure ne seraient pas dues, paraît-il, à une imperfection du phototype, car on en retrouve de semblables sur toutes les photographies d'éclairs. Il faut aussi remarquer les franges lumineuses qui forment une sorte d'auréole à la gauche du globe » ⁽¹⁾.

Si nous ne nous trompons pas, le globe présente sur la droite un embryon d'appendice caudal, qui montre que son mouvement devait s'effectuer de la droite vers la gauche. Le contour apparent est nettement circulaire, malgré la rapidité du mouvement. Le refroidissement

(1) Frédéric Dillaye, Les Nouveautés photographiques, année 1894, Paris, Librairie Tallandier, 75, rue Dareau.

énorme de la partie antérieure (gauche) et des parties supérieure et inférieure de sa surface détermine une décomposition abondante des molécules superficielles de la matière fulminante, les gaz entraînant dans leur mouvement des parcelles de matière fulminante incandescente. Les jets sont normaux à la surface du globe : cette vitesse normale étant combinée avec la vitesse de translation horizontale diminuée de la résistance de l'air, la vitesse résultante des jets, en haut comme en bas, est déviée vers la gauche de la normale au globe.

Les taches nous paraissent s'expliquer par des parcelles de matière fulminante abandonnées par le globe et dès lors se mouvant moins vite que lui : aussi se voient-elles à peu près exclusivement à la droite du globe, c'est-à-dire derrière lui.

La partie du contour apparent du globe située à l'arrière (à droite) et au-dessus du petit appendice caudal, étant protégée contre le refroidissement dû au contact de l'air, se décompose peu et ne donne pas lieu à un dégagement sensible de gaz, aussi ne montre-t-elle pas les *franges lumineuses* signalées par M. Frédéric Dillaye.

TRAVAUX DES SECTIONS

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES OSCILLATIONS D'UN ALTERNATEUR OU MOTEUR SYNCHROME ⁽¹⁾

par M. F. MARGAND,

Ingénieur Civil des Mines

Introduction.

La présente étude est une nouvelle application des formules générales que nous avons proposées dans une note parue aux Comptes rendus de l'Académie des Sciences ⁽²⁾ pour étudier le fonctionnement des alternateurs et moteurs synchrones dans l'état variable, et que nous avons déjà utilisées à l'étude des essais en court-circuit et des essais statiques ⁽³⁾.

Nous rappelons tout d'abord les principes posés et les relations données dans ces notes antérieures.

Dans le cas particulier du régime permanent, ces relations prennent une forme simple qui correspond au diagramme des deux réactions de M. Blondel, et qu'il nous est également utile de rappeler.

Nous formons ensuite par la méthode des petits mouvements, classique en mécanique, les équations différentielles linéaires auxquelles doivent satisfaire les petites oscillations d'une machine autour d'un régime permanent. Les équations ainsi obtenues s'appliqueront aux différents problèmes d'oscillations que l'on peut envisager et qu'il faut préciser par les données extérieures du fonctionnement de la machine. Nous les utilisons ici à l'étude particulière du problème le plus usuel, et le plus important en pratique, des oscillations d'une machine à excitation fixe, reliée à un réseau de tension donnée et soumise à un couple mécanique déterminé.

(1) Communication présentée à la séance du 9 octobre de la 1^{re} section. Présidence de M. Darrieus.

(2) F. MARGAND. Equations générales d'une machine synchrone non saturée hors du régime normal. Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, 23 avril 1928, t. CLXXXVI, page 1109.

(3) F. MARGAND. Contribution à la théorie des essais en court-circuit des alternateurs. *Revue générale de l'Electricité*, du 16 juin 1928, t. XXIII, pages 1011-1033. Théorie des essais statiques des alternateurs et moteurs synchrones. *Revue générale de l'Electricité*, du 14 septembre 1929, t. XXVI, page 401.

L'oscillation libre qui peut prendre naissance par l'effet des variations des données : excitation, couple ou tension, dépend d'une équation caractéristique du sixième degré dont les racines donnent 1° une vibration rapide de pulsation voisine de celle du réseau, vibration affectant surtout les grandeurs électriques, flux et courant, peu sensible sur le mouvement du rotor. 2° Une oscillation lente se composant en général d'un terme périodique amorti et de deux termes apériodiques.

La stabilité de la machine exige que tous les termes de l'oscillation libre tendent vers zéro quand le temps augmente infiniment, c'est-à-dire que toutes les racines de l'équation caractéristique soient pseudo-négatives.

Nous analysons ces différents mouvements et leurs conditions de stabilité, en considérant séparément, pour simplifier la question, l'influence des courants d'amortissement et l'influence de la résistance de l'induit.

D'après cette analyse, l'inégalité des réactions directe et transversale de la machine, dont nous tenons compte dans l'ensemble de cette étude, modifie l'expression du couple synchronisant, mais n'introduit en elle-même aucun terme d'amortissement dans les oscillations.

Les courants d'amortissement provoquent la convergence de l'oscillation lente, et font apparaître par leurs constantes de temps, les deux mouvements apériodiques signalés ci-dessus. Il n'ont pas d'influence sur la vibration rapide. Celle-ci est rendue convergente par la résistance de l'induit.

Sur l'oscillation lente, cette résistance d'induit exerce, au contraire, dans les conditions usuelles, une action défavorable à la stabilité.

Ce fait a été démontré, pour les machines à réactions égales, en 1917 par M. Henri CHIPART, Inspecteur général des Mines (*). Il subsiste, comme nous le montrons, dans le cas général où les réactions sont différentes.

Il découle de ces résultats, que la condition *nécessaire* de stabilité, exprimant que le terme constant de l'équation caractéristique (qui correspond au couple synchronisant de la théorie élémentaire), est positif, est en général dans les machines usuelles une condition *suffisante* mais que toutefois, l'instabilité peut apparaître dans le

(*) H. CHIPART. Cours d'Electrotechnique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (inédit).

cas exceptionnel d'une machine à très faibles courants d'amortissement, reliée au réseau par une longue ligne résistante.

Première Partie.

I. — EQUATIONS GÉNÉRALES D'UNE MACHINE SYNCHROME TRIPHASÉE, DANS L'ÉTAT VARIABLE.

Soient (fig. 1),

$$\theta_1, \quad \theta_2 = \theta_1 + \frac{2\pi}{3}, \quad \theta_3 = \theta_1 + \frac{4\pi}{3}$$

les angles des axes des trois phases de l'induit avec l'axe des pôles inducteurs; i_1, i_2, i_3 , le courant circulant dans les trois phases.

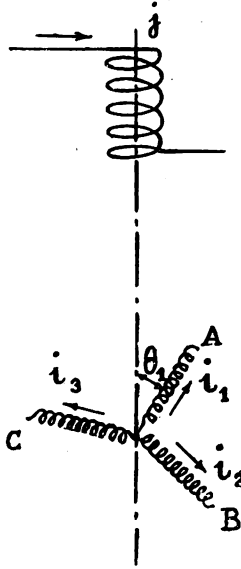


Figure 1.

Ces grandeurs seront dans l'état variable le plus général, des fonctions quelconques du temps sur lesquelles nous ne faisons aucune hypothèse particulière.

Nous définissons à partir des i_1, i_2, i_3 , les trois grandeurs suivantes :

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{2}{3} (i_1 \cos \theta_1 + i_2 \cos \theta_2 + i_3 \cos \theta_3) \\ Y &= \frac{2}{3} (i_1 \sin \theta_1 + i_2 \sin \theta_2 + i_3 \sin \theta_3) \\ i_n &= \frac{1}{3} (i_1 + i_2 + i_3) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

que nous appelons courant direct, courant transversal et courant moyen.

On peut inversement en résolvant ces relations par rapport à $i_1 i_2 i_3$ écrire :

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= i_n + X \cos \theta_1 + Y \sin \theta_1 \\ i_2 &= i_n + X \cos \theta_2 + Y \sin \theta_2 \\ i_3 &= i_n + X \cos \theta_3 + Y \sin \theta_3 \end{aligned} \right\} \quad (1')$$

Les flux dans chaque phase peuvent s'écrire sous la forme suivante

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi_1 &= \lambda i_1 - \mu i_2 - \mu i_3 + \Phi_f \cos \theta_1 + \Phi_t \sin \theta_1 \\ \Phi_2 &= \lambda i_2 - \mu i_1 - \mu i_3 + \Phi_f \cos \theta_2 + \Phi_t \sin \theta_2 \\ \Phi_3 &= \dots\dots\dots \end{aligned} \right.$$

Φ_f et Φ_t représentent les flux direct et transversal

λ et μ sont la self inductance et l'inductance mutuelle des fuites hors de l'entrefer par les encoches, têtes de bobines, etc.....

En portant les valeurs (1') dans les expressions ci-dessus, on aura trois relations de la forme :

$$\Phi_1 = (\lambda - 2\mu) i_n + [\Phi_f + (\lambda + \mu) X] \cos \theta_1 + [\Phi_t + (\lambda + \mu) Y] \sin \theta_1$$

dans lesquelles apparaissent les grandeurs suivantes :

$\lambda + \mu = S$; inductance des fuites propres de l'induit en triphasé équilibré.

$\lambda - 2\mu = \sigma$: inductances des fuites relatives au courant moyen

$F_f = \Phi_f + SX$: flux direct total (fuites comprises)

$F_t = \Phi_t + SY$: flux transversal total (fuites comprises).

Nous supposons dans toute cette étude qu'il n'y a pas de fil neutre, donc que $i_n = 0$. On a alors avec les notations ci-dessus :

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi_1 &= + F_f \cos \theta_1 + F_t \sin \theta_1 \\ \Phi_2 &= + F_f \cos \theta_2 + F_t \sin \theta_2 \\ \Phi_3 &= + F_f \cos \theta_3 + F_t \sin \theta_3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Si r désigne la résistance ohmique d'une phase, la tension aux bornes sera :

$$u = -ri - \frac{d\Phi}{dt}.$$

On aura donc d'après (2).

$$\left\{ \begin{aligned} u_1 &= -ri_1 - \frac{d}{dt} [F_f \cos \theta_1 + F_t \sin \theta_1] \\ u_2 &= -ri_2 - \frac{d}{dt} [F_f \cos \theta_2 + F_t \sin \theta_2] \\ u_3 &= -ri_3 - \frac{d}{dt} [F_f \cos \theta_3 + F_t \sin \theta_3] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Relations entre les flux et courants directs et transversaux. — Nous désignerons par F_0 le flux constant produit dans l'induit par le courant continu d'excitation, que nous supposons fixe.

Dans l'état variable, il faut tenir compte des flux dus aux courants variables, qui prennent naissance dans le circuit inducteur lui-même, dans les pôles s'ils sont massifs, dans les circuits amortisseurs s'il y en a. Nous admettons que tous ces courants qui concourent à l'amortissement sont équivalents en première approximation, à un système de deux courants; l'un *direct*, z_1 circulant dans un circuit caractérisé par une résistance r_1 , une self l_1 et une inductance mutuelle avec l'induit m_1 ; l'autre *transversal*, z_2 de caractéristiques : r_2, l_2, m_2 .

On a ainsi le système d'équations suivant :

$$F_t = F_0 + (S + A)X + m_1 z_1 \quad r_1 z_1 + l_1 \frac{dz_1}{dt} + \frac{3}{2} m_1 \frac{dX}{dt} = 0$$

$$F_t = (S + B)Y + m_2 z_2 \quad r_2 z_2 + l_2 \frac{dz_2}{dt} + \frac{3}{2} m_2 \frac{dY}{dt} = 0.$$

Éliminons z_1 et z_2 entre ces relations et posons :

$$S + K_1 = (S + A) - \frac{3}{2} \frac{m_1^2}{l_1} \quad \epsilon_1 = \frac{r_1}{l_1}$$

$$S + K_2 = (S + B) - \frac{3}{2} \frac{m_2^2}{l_2} \quad \epsilon_2 = \frac{r_2}{l_2}$$

il viendra :

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} [F_t - (S + K_1) X] + \epsilon_1 [F_t - F_0 - (S + A) X] &= 0 \\ \frac{d}{dt} [F_t - (S + K_2) Y] + \epsilon_2 [F_t - (S + B) Y] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ou encore en désignant par :

$$\sigma_1 = \frac{(S + K_1)}{(S + A)} \quad \sigma_2 = \frac{(S + K_2)}{(S + B)} \quad \text{les coefficients de dispersion}$$

$$\left. \begin{aligned} F_t + \frac{1}{\epsilon_1} \frac{d}{dt} F_t - (S + A) \left[X + \frac{\sigma_1}{\epsilon_1} \frac{d}{dt} X \right] &= F_0 \\ F_t + \frac{1}{\epsilon_2} \frac{d}{dt} F_t - (S + B) \left[Y + \frac{\sigma_2}{\epsilon_2} \frac{d}{dt} Y \right] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4 \text{ bis})$$

$(S + K_1)$, $(S + K_2)$ sont les coefficients des fuites entre induit et circuits concourant à l'amortissement, rapportés à l'induit; σ_1 , σ_2 sont les coefficients de dispersion relatifs à ces fuites; ϵ_1 , ϵ_2 sont les constantes de temps des circuits d'amortissement.

Expression du couple électromagnétique. — Nous avons démontré ailleurs ⁽¹⁾, que l'expression dans l'état variable du couple électromagnétique agissant sur le rotor (compté positivement dans le sens de la marche) est :

$$C = \frac{3}{2} (XF_l - YF_l).$$

Donc si J est le moment d'inertie du rotor et C_m le couple mécanique appliqué à l'arbre, l'équation du mouvement de rotation sera :

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = C + C_m$$

c'est-à-dire

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{3}{2} (YF_l - XF_l) = C_m.$$

Cette formule suppose la machine bipolaire. Si elle a $2p$ pôles, la vitesse sera :

$$\frac{1}{p} \frac{d\theta}{dt} \quad \text{et le couple} \quad \frac{3}{2} p (YF_l - XF_l).$$

La relation ci-dessus s'écrira alors en posant : $K = \frac{J}{p^2}$.

$$K \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{3}{2} (YF_l - XF_l) = \frac{1}{p} C_m. \quad (6)$$

En résumé, le fonctionnement de la machine synchrone dans l'état variable est définie par les neuf relations (1) ou (1 bis), (3), (4 ou 4 bis) et (5), liant les treize grandeurs.

$$\theta, X, Y, F_l, F_r, F_0, u_1, u_2, u_3, i_1, i_2, i_3, C_m.$$

Cas d'une machine saturée. — Les équations ci-dessus qui expriment les flux en fonction des courants, sous forme linéaire, ne s'appliquent en toute généralité qu'en l'absence de saturation magnétique. Mais quand on se limite comme nous le faisons dans cette étude à des états variables s'écartant peu d'un régime donné, elles restent applicables à une machine saturée. Il suffit de définir les coefficients d'induction non pas par les rapports des flux aux courants, mais par les rapports des variations de ces grandeurs, comptées à partir des valeurs du régime considéré.

(1) F. MARGAND. Expression du couple électromagnétique des alternateurs et moteurs synchrones dans l'état variable. *Revue générale de l'Electricité*, du 25 janvier 1930, t. XXVII, p. 123.

II. — RAPPEL DES ÉQUATIONS DU RÉGIME PERMANENT.

1° Le régime permanent d'une machine synchrone est, par définition, la solution particulière des équations générales correspondant à une vitesse de rotation fixe $\frac{d\theta}{dt} = \omega$ et à des flux et courants directs et transversaux également fixes. Les tensions et courants des phases sont alors des fonctions sinusoïdales du temps, formant un système triphasé équilibré.

Le couple C_m est fixe, et les circuits d'amortissement ne sont parcourus par aucun courant.

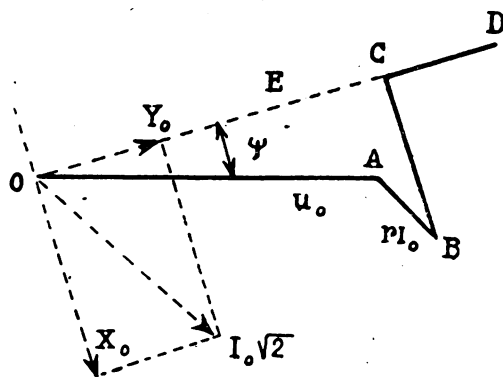


Figure 2.

En marquant de l'indice $_0$ toutes les grandeurs correspondant à un tel régime, on a d'après (4) :

$$\left. \begin{aligned} F_0 &= F_0 + (S + A)X_0 \\ F_0 &= (S + B)Y_0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

et d'après (1') et (3)

$$\left. \begin{aligned} i &= X_0 \cos \theta_0 + Y_0 \sin \theta_0 \\ u &= [F_0 \omega - rY_0] \sin \theta_0 - [F_0 \omega + rX_0] \cos \theta_0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

θ_0 prenant pour les différentes phases successivement les valeurs :

$$\theta_{01} = \omega t, \quad \theta_{02} = \omega t + \frac{2\pi}{3}, \quad \theta_{03} = \omega t + \frac{4\pi}{3}$$

Ces relations (6) et (7) se traduisent géométriquement par le diagramme de Blondel (fig. 2).

$$\begin{aligned} \overline{OD} &= \frac{F_0 \omega}{\sqrt{2}} = E \quad (E, \text{valeur efficace de la f. e. m. à vide}) \\ \overline{DC} &= (S + A) \frac{\omega X_0}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

$$\overline{OC} = \frac{F_{t0} \omega}{\sqrt{2}}$$

$$\overline{CB} = (S + B) \frac{\omega Y_0}{\sqrt{2}} = \frac{F_{t0} \omega}{\sqrt{2}}$$

$$OA = U \quad U \text{ tension efficace}$$

$$AB = r I_0 \quad I_0 \text{ courant efficace}$$

En désignant par ψ le déphasage de U en arrière de E les projections du contour OAB sur la direction OD et sur la direction perpendiculaire donnent

$$\begin{aligned} U \sqrt{2} \cos \psi &= F_{t0} \omega - r Y_0 \\ U \sqrt{2} \sin \psi &= F_{t0} \omega + r X_0 \end{aligned} \quad (8)$$

2° Les relations (6) et (8) permettent d'exprimer X_0 , Y_0 , F_{t0} , F_{r0} en fonction de la force électro-motrice à vide $E = \frac{F_{r0} \omega}{\sqrt{2}}$, de la tension U et du déphasage ψ . Il vient :

$$\left. \begin{aligned} F_{r0} \left[\omega^2 + \frac{r^2}{(S+A)(S+B)} \right] &= \omega U \sqrt{2} \cos \psi + \frac{r}{(S+B)} \left[U \sqrt{2} \sin \psi + \frac{r \cdot E \sqrt{2}}{(S+A)\omega} \right] \\ F_{t0} \left[\omega^2 + \frac{r^2}{(S+A)(S+B)} \right] &= \omega U \sqrt{2} \sin \psi + \frac{r}{(S+A)} \left[-U \sqrt{2} \cos \psi + E \sqrt{2} \right] \\ X_0 &= \frac{F_{t0} - F_{r0}}{(S+A)} \quad Y_0 = \frac{F_{t0}}{(S+B)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Si $r = 0$, ces relations donnent plus simplement

$$\left. \begin{aligned} F_{r0} &= \frac{U \sqrt{2} \cos \psi}{\omega} & F_{t0} &= \frac{U \sqrt{2}}{\omega} \sin \psi \\ X_0 &= \frac{U \sqrt{2} \cos \psi - E \sqrt{2}}{(S+A)\omega} & Y_0 &= \frac{U \sqrt{2} \sin \psi}{(S+B)\omega} \end{aligned} \right\} \quad (9 \text{ bis})$$

Dans le cas où les réactions sont égales, en posant

$$S + A = S + B = L \quad \text{et} \quad \frac{r}{L\omega} = \tan \alpha$$

les relations (9) s'écrivent :

$$\left. \begin{aligned} F_{r0} &= \cos \alpha \cos (\psi - \alpha) \frac{U \sqrt{2}}{\omega} + \frac{E \sqrt{2}}{\omega} \sin^2 \alpha \\ F_{t0} &= \cos \alpha \sin (\psi - \alpha) \frac{U \sqrt{2}}{\omega} + \sin \alpha \cos \alpha \frac{E \sqrt{2}}{\omega} \end{aligned} \right\} \quad (9 \text{ ter})$$

3° Le couple appliqué à l'arbre en régime permanent, a pour expression d'après (5)

$$C_{m0} = \frac{3}{2} p [Y_0 F_{t0} - X_0 F_{r0}]$$

ou encore en tenant compte de (6) :

$$C_{m0} = \frac{3}{2} p \left[\frac{E \sqrt{2} \cdot F_{t0}}{(S + A) \omega} + F_{t0} F_{t0} \left(\frac{1}{S + B} - \frac{1}{S + A} \right) \right]. \quad (10)$$

Si $r = 0$ cette formule donne d'après (9 bis).

$$C_{m0} = 3 \left[\frac{EU \sin \psi}{(S + A) \omega^2} + \frac{U^2}{\omega^2} \sin \psi \cos \psi \left(\frac{1}{S + B} - \frac{1}{S + A} \right) \right]. \quad (10 \text{ bis})$$

Si les réactions sont égales, on a simplement :

$$C_{m0} = - \frac{3 E \sqrt{2} \cdot F_{t0}}{L \cdot \omega}. \quad 10 (\text{ter})$$

La marche de la machine synchrone en génératrice (alternateur) correspond à $C_{m0} > 0$, c'est-à-dire généralement :

$$\psi > 0 \quad Y_0 > 0 \quad \text{et} \quad F_{t0} > 0 \quad (\text{figure 3 et 4}).$$

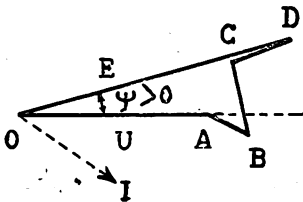


Figure 3.

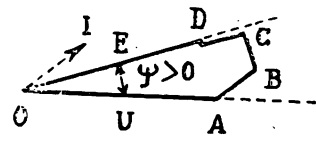


Figure 4.

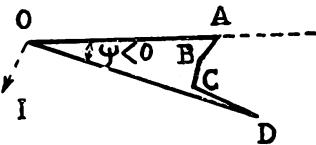


Figure 5.

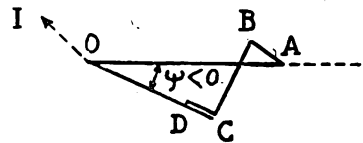


Figure 6.

Le signe de X_0 dépend de la valeur de l'excitation.

S'il y a surexcitation (fig. 3) $X_0 < 0$

S'il y a sous excitation (fig. 4) $X_0 > 0$

La marche en réceptrice (moteur synchrone) correspond à $C_{m0} < 0$ donc généralement :

$$\psi < 0 \quad Y_0 < 0 \quad F_{t0} < 0 \quad (\text{fig. 5 et 6}).$$

S'il y a surexcitation (fig. 5) $X_0 < 0$

S'il y a sous excitation (fig. 6) $X_0 > 0$.

On doit remarquer que la transition entre les fonctionnements en alternateur et en moteur [$C_{m0} = 0$] ne correspond à $\psi = 0$ exactement que si les réactions sont égales et si $r = 0$.

III. — EQUATIONS DES PETITS MOUVEMENTS AUTOUR D'UN RÉGIME PERMANENT.

Ces équations s'obtiendront en remplaçant dans les équations générales (1 ou 1 bis), (3), (4) ou 4 bis), (5), du paragraphe I, les grandeurs θ , X , Y , F_t , F_l , i , u , C_m , par les expressions

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \theta_0 + \Delta\theta, & X &= X_0 + \Delta X, & Y &= Y_0 + \Delta Y \\ F_t &= F_{t0} + \Delta F_t, & F_l &= F_{l0} + \Delta F_l, \\ i &= i_0 + \Delta i, & u &= u_0 + \Delta u, & C_m &= C_{m0} + \Delta C_m \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

dans lesquelles $\Delta\theta$, ΔX , ΔY , ΔF_t , etc.... représentent les petites variations des grandeurs correspondantes, à partir des valeurs θ_0 , X_0 , Y_0 , F_{t0} ,..... du régime permanent.

On développera les expressions obtenues, en traitant les $\Delta\theta$, ΔX ,.... ΔF_t , etc... comme des infiniment petits, c'est à-dire, en négligeant leurs carrées ou leurs doubles produits. On tiendra compte de ce que les valeurs du régime permanent satisfont aux relations établies au paragraphe II et on aboutira ainsi à un groupe d'équations différentielles linéaires liant les petits mouvements.

Ces équations seront en quelques sorte les différentielles totales des équations générales, et cette méthode n'est autre que la méthode classique, employée en mécanique pour l'étude des petits mouvements d'un système (1).

Exécutons le calcul pour les relations (5) (4 bis) (1 bis) et (3) successivement :

Equation des variations cinétiques. — En effectuant dans l'équation (5)

$$K \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{3}{2} (YF_t - XF_t) = \frac{1}{p} C_m;$$

la substitution (11), en négligeant comme il a été dit les termes du second ordre de petitesse, et en tenant compte de la relation donnée par le régime permanent :

$$\frac{3}{2} (Y_0 F_{t0} - X_0 F_{l0}) = \frac{1}{p} C_{m0}.$$

On obtient pour équation des variations cinétiques :

$$K \frac{d^2}{dt^2} \Delta\theta + \frac{3}{2} [F_{t0} \Delta Y - F_{l0} \Delta X + Y_0 \Delta F_t - X_0 \Delta F_l] = \frac{1}{p} \Delta C_m. \quad (12)$$

(1) G. APPELL. Mécanique rationnelle, t. II.

Equations liant les variations des flux et courants directs et transversaux. La substitution (11) effectuée dans les deux relations (4 bis) donne aisément :

$$\left. \begin{aligned} \Delta F_1 + \frac{1}{\varepsilon_1} \frac{d}{dt} \Delta F_1 - (S + A) \left[\Delta X + \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \frac{d}{dt} \Delta X \right] &= 0 \\ \Delta F_2 + \frac{1}{\varepsilon_2} \frac{d}{dt} \Delta F_2 - (S + B) \left[\Delta Y + \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} \frac{d}{dt} \Delta Y \right] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Equations des variations des courants des phases. — Nous nous placerons dans le cas le plus fréquent, où il n'y a pas de fil neutre : $i_n = 0$.

Les formules (1 bis) donnent alors en laissant indéterminé l'indice de la phase :

$$i = X \cos \theta + Y \sin \theta.$$

Remplaçons θ par $\theta_0 + \Delta\theta$, X par $X_0 + \Delta X$, Y par $Y_0 + \Delta Y$, développons les sinus et cosinus en posant suivant l'approximation admise :

$$\cos \Delta\theta = 1 \quad \sin \Delta\theta = \Delta\theta.$$

Et tenons compte de ce que le régime permanent donne

$$i_0 = X_0 \cos \theta_0 + Y_0 \sin \theta_0$$

Il viendra

$$\Delta i = [\Delta X + Y_0 \Delta\theta] \cos \theta_0 + [\Delta Y - X_0 \Delta\theta] \sin \theta_0. \quad (14)$$

Chaque phase donnera une relation de cette forme, avec $\theta_0 = \omega t$ pour la première phase et

$$\theta_0 = \omega t + \frac{2\pi}{3}, \theta_0 = \omega t + \frac{4\pi}{3} \text{ pour les deux autres.}$$

Les trois relations ainsi obtenues, combinées linéairement de manière à former les expressions

$$\Sigma \Delta i \cos \theta_0 = \Delta i_1 \cos \omega t + \Delta i_2 \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + \Delta i_3 \cos \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} \right)$$

$$\Sigma \Delta i \sin \theta_0 = \Delta i_1 \sin \omega t + \Delta i_2 \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + \Delta i_3 \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} \right)$$

donneront :

$$\left. \begin{aligned} \Delta X + Y_0 \Delta\theta &= \frac{2}{3} \Sigma \Delta i \cos \theta_0 \\ \Delta Y - X_0 \Delta\theta &= \frac{2}{3} \Sigma \Delta i \sin \theta_0. \end{aligned} \right\} \quad (14 \text{ bis})$$

Equations des variations de tension. — Dans la relation (3)

$$u + ri = - \frac{d}{dt} (F_1 \cos \theta + F_2 \sin \theta),$$

remplaçons i par l'expression

$$i = X \cos \theta + \sin \theta \text{ et effectuons la substitution (11).}$$

En tenant compte de la relation du régime permanent, il viendra :

$$\Delta u = -\cos \theta_0 \left[\frac{d}{dt} \Delta F_t + F_{t0} \frac{d}{dt} \Delta \theta + \omega \Delta F_t - \omega F_{t0} \Delta \theta + r(\Delta X + Y_0 \Delta \theta) \right] \\ + \sin \theta_0 \left[-\frac{d}{dt} \Delta F_t + F_{t0} \frac{d}{dt} \Delta \theta + \omega \Delta F_t + \omega F_{t0} \Delta \theta - r(\Delta Y - X_0 \Delta \theta) \right]. \quad (15)$$

On a une relation de cette forme pour chaque phase, en remplaçant successivement θ_0 par

$$\omega t, \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right), \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} \right),$$

et si l'on combine linéairement ces relations de manière à former les expressions :

$$\Sigma \Delta u \cos \theta_0 = \Delta u_1 \cos \omega t + \Delta u_2 \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + \Delta u_3 \cos \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} \right)$$

$$\Sigma \Delta u \sin \theta_0 = \Delta u_1 \sin \omega t + \Delta u_2 \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + \Delta u_3 \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} \right)$$

elles donneront :

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta F_t + F_{t0} \frac{d}{dt} \Delta \theta + \omega \Delta F_t - \omega F_{t0} \Delta \theta + r(\Delta X + Y_0 \Delta \theta) &= -\frac{2}{3} \Sigma \Delta u \cos \theta_0 \\ -\frac{d}{dt} \Delta F_t + F_{t0} \frac{d}{dt} \Delta \theta + \omega \Delta F_t + \omega F_{t0} \Delta \theta - r(\Delta Y - X_0 \Delta \theta) &= \frac{2}{3} \Sigma \Delta u \sin \theta_0. \end{aligned} \right\} \quad (15 \text{ bis})$$

En résumé, les dix variations :

$\Delta \theta, \Delta X, \Delta Y, \Delta F_t, \Delta F_r, \Sigma \Delta u \sin \theta_0, \Sigma \Delta u \cos \theta_0, \Sigma \Delta i \sin \theta_0, \Sigma \Delta i \cos \theta_0, \Delta C,$
sont liées par les 7 équations différentielles linéaires :

$$12, \quad 13, \quad 14 \text{ bis}, \quad 15 \text{ bis},$$

que nous groupons en ordonnant les termes dans l'ordre des variables ci-dessus :

$$\frac{2}{3} K \frac{d^2}{dt^2} \Delta \theta - F_{t0} \Delta X + F_{r0} \Delta Y + Y_0 \Delta F_t - X_0 \Delta F_r = \frac{2}{3p} \Delta C_m \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} -(S + A) \left[\Delta X + \frac{\sigma_1}{\epsilon_1} \frac{d}{dt} \Delta X \right] + \Delta F_t + \frac{1}{\epsilon_1} \frac{d}{dt} \Delta F_t &= 0 \\ -(S + B) \left[\Delta Y + \frac{\sigma_2}{\epsilon_2} \frac{d}{dt} \Delta Y \right] + \Delta F_r + \frac{1}{\epsilon_2} \frac{d}{dt} \Delta F_r &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{t0} \frac{d}{dt} \Delta \theta - (\omega F_{t0} - r Y_0) \Delta \theta + r \Delta X + \frac{d}{dt} \Delta F_t + \omega \Delta F_t &= -\Sigma \Delta U \cos \theta_0 \\ F_{r0} \frac{d}{dt} \Delta \theta + (\omega F_{r0} + r X_0) \Delta \theta - r \Delta Y + \omega \Delta F_r - \frac{d}{dt} \Delta F_r &= \Sigma \Delta U \sin \theta_0 \end{aligned} \right\} \quad (15 \text{ bis})$$

$$\left. \begin{aligned} Y_0 \Delta \theta + \Delta X &= \Sigma \Delta i \cos \theta_0 \\ -X_0 \Delta \theta + \Delta Y &= \Sigma \Delta i \sin \theta_0. \end{aligned} \right\} \quad (14 \text{ bis})$$

Pour étudier à l'aide de ces équations, le problème des oscillations et de la stabilité d'une machine, il est nécessaire de préciser les *conditions extérieures* du fonctionnement de cette machine, qui devront donner pour achever de définir le problème trois relations supplémentaires entre les 10 variables liées par les 7 relations obtenues.

Ces conditions seront en général relatives au couple ou à la puissance mécanique sur l'arbre, et à la caractéristique électrique du circuit extérieur auquel l'induit est relié.

Il peut s'agir, par exemple, d'un alternateur ou moteur synchrone relié à un réseau de *tension donnée*, ou, cas tout différent, et non usuel d'ailleurs, d'une machine placée sur un circuit *d'intensité déterminée*; ou bien encore, d'un alternateur alimentant seul un circuit caractérisé par son impédance. Il y a là autant de problèmes distincts.

Nous ne traiterons ici de façon détaillée que le premier problème relatif à la machine synchrone reliée à un réseau de tension donnée, indépendante du courant débité. Nous supposerons le couple appliqué à l'arbre donné en fonction du temps.

Deuxième Partie.

I. — OSCILLATION D'UNE MACHINE SYNCHROME FONCTIONNANT A EXCITATION FIXE, TENSIONS ET COUPLE DONNÉS.

Les tensions appliquées aux bornes de l'induit seront de la forme :

$$\begin{aligned} u_1 &= U \sqrt{2} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \psi \right) + f_1(t) \\ u_2 &= U \sqrt{2} \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} - \psi \right) + f_2(t) \\ u_3 &= U \sqrt{2} \cos \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} - \frac{\pi}{2} - \psi \right) + f_3(t). \end{aligned}$$

$$C_m = C_{m0} + \varphi(t).$$

Les fonctions $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$, $\varphi(t)$ représentant les variations, petites par hypothèse, des données correspondantes, à partir de leurs valeurs normales.

En remplaçant dans les équations (12) (13) (15 bis) du chapitre précédent, les Δu , Δu_2 , Δu_3 , ΔC_m , par les fonctions, $f_1(t)$, $f_2(t)$, $\varphi(t)$, es seconds membres deviendront des fonctions données du temps,

et ces *cinq relations* formeront alors un système d'équations différentielles linéaires définissant les cinq variations :

$$\Delta \theta, \quad \Delta X, \quad \Delta Y, \quad \Delta F_i, \quad \Delta F_e.$$

La solution générale de ce système représentera l'oscillation de la machine dans les conditions fixées. On remarquera que les relations (14 bis) n'entrent pas dans le système considéré. Ces relations donneront les valeurs des variations des courants Δi , en y portant les expressions de $\Delta \theta$, ΔX , ΔY données par l'intégration des cinq autres équations (1).

L'intégrale générale de ces équations linéaires à coefficients constants (12), (13) (15 bis) comprendra :

1° Les solutions des équations sans seconds membres, formant ce qu'on appelle *l'oscillation libre* du système.

2° Une intégrale particulière correspondant aux fonctions des seconds membres qui représentent les variations des données C_m, u .

Dans le cas le plus important en pratique, où les variations de ces données sont *périodiques*, la solution particulière de même période qui leur correspond s'obtient aisément et porte le nom d'*oscillation forcée*.

Nous laisserons ici de côté la question des oscillations forcées, et ne nous occuperons que de l'étude de l'oscillation libre et des conditions de stabilité qui s'en déduisent.

Oscillation libre. — La méthode d'Euler pour obtenir les solutions des équations différentielles linéaires à coefficients constants, sans seconds membres, est classique.

On recherche les intégrales particulières de la forme :

$$\left. \begin{aligned} \Delta \theta &= a e^{zt} & \Delta X &= \lambda' a e^{zt} & \Delta F_i &= \lambda'' a e^{zt} \\ \Delta Y &= \lambda' a e^{zt} & \Delta F_e &= \lambda''' a e^{zt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$a, \lambda, \lambda', \lambda'', \lambda'''$ étant des constantes à déterminer.

En portant ces expressions dans le système [(12), (13), (15 bis)] il vient :

$$\left. \begin{aligned} &\frac{2}{3} K z^2 \cdot a - F_{i0} \lambda a + F_{e0} \lambda' a + Y_0 \lambda'' a - X_0 \lambda''' a = 0 \\ &\dots - (S + A) \left(1 + \frac{\sigma_1}{\epsilon_1} z\right) \lambda a \dots + \left(1 + \frac{1}{\epsilon_1} z\right) \lambda'' a \dots = 0 \\ &\dots - (S + B) \left(1 + \frac{\sigma_2}{\epsilon_2} z\right) \lambda' a \dots + \left(1 + \frac{1}{\epsilon_2} z\right) \lambda''' a = 0 \\ &[F_{i0} z - \omega F_{i0} + r Y_0] a + r \lambda a \dots + z \lambda' a + \omega \lambda'' a = 0 \\ &[F_{e0} z + \omega F_{e0} + r X_0] a \dots - r \lambda' a + \omega \lambda'' a - z \lambda''' a = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(1) S'il s'agissait d'une machine fonctionnant sur un circuit de courant donné, ce serait au contraire le système des équations 12, 13, 14 bis qui définirait le problème, et les équations (15 bis), qui n'entreraient pas en jeu.

Pour que ces équations linéaires homogènes en $a, \lambda a, \lambda' a, \lambda'' a, \lambda''' a$, soient compatibles, il faut que leur déterminant soit nul.

Ce qui donne l'équation caractéristique en z .

$$\begin{vmatrix} \frac{2}{3} K z^2 & F_{I_0} & -F_{I_0} & Y_0 & -X_0 \\ 0 & (S+A) \left(1 + \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} z\right) & 0 & \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_1} z\right) & 0 \\ 0 & 0 & (S+B) \left(1 + \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} z\right) & 0 & \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_2} z\right) \\ (F_{I_0} z - \omega F_{I_0} + r Y_0) & -r & 0 & z & \omega \\ (F_{I_0} z + \omega F_{I_0} + r X_0) & 0 & +r & \omega & -z \end{vmatrix} = 0 \quad (3).$$

Cette équation caractéristique en z est du 6° degré. A chaque racine *réelle* de cette équation correspond une intégrale particulière de la forme (1). L'un des coefficients, a par exemple, est arbitraire, les quatre autres, $\lambda a, \lambda' a, \lambda'' a, \lambda''' a$, sont déterminés par les équations linéaires (2).

Les racines imaginaires conjuguées de l'équation caractéristique

$$z = -n \pm i\nu \quad (i = \sqrt{-1})$$

donnent, en combinant les exponentielles imaginaires qui leur correspondent :

$$e^{(-n+i\nu)t} \quad \text{et} \quad e^{(-n-i\nu)t}$$

une solution réelle de la forme .

$$ae^{-nt} \cos(\nu t + \beta) \quad (4)$$

contenant deux constantes arbitraires a et β .

La solution complète du système sans seconds membres sera la somme de toutes les solutions de la forme (1) ou de la forme (4) correspondant aux différentes racines de l'équation caractéristique.

Elle comprendra six constantes arbitraires.

Condition de stabilité. — Pour qu'il y ait stabilité de la machine, il faut évidemment que les oscillations libres qui peuvent prendre naissance à toute variation des données de fonctionnement, soient *amorties*, c'est-à-dire d'amplitude décroissante, ce qui exige que tous les termes exponentiels des formes (1) ou (4) aient des exposants négatifs, donc que toutes les racines de l'équation caractéristique soient à partie réelle négative.

Ce résultat pose un intéressant problème d'algèbre qui s'énonce : condition nécessaire et suffisante pour que toutes les racines d'une

équation algébrique du 9° degré soient pseudo-négatives; c'est-à-dire à partie réelle négative.

Ce problème a été résolu par HERMITE, ROUTH et HURWITZ, ainsi que par MM. LIÉNARD et CHIPART (*) dont nous utiliserons les résultats.

Comme l'étude directe de l'équation caractéristique du 6° degré présenterait des difficultés inextricables, nous allons simplifier la question en étudiant successivement deux cas particuliers où cette équation s'abaisse au 4° degré. Dans le premier nous supposerons la résistance de l'induit négligeable; dans le second, nous analyserons l'influence de cette résistance, abstraction faite des courants d'amortissement.

Le rapprochement des résultats ainsi obtenus sera suffisant pour l'analyse sommaire du cas général.

Il sera commode pour l'examen de ces cas particuliers de partir d'une forme de l'équation caractéristique différente de (3) que nous obtiendrons de la façon suivante. Remplaçons le terme de la première colonne du déterminant (3) par la somme des termes des cinq colonnes multipliées respectivement par

$$1, \quad \frac{F_{10}}{S+A}, \quad -\frac{F_{10}}{S+B}, \quad -F_{10}, \quad +F_{10}.$$

Multiplions les termes des deuxième et troisième colonnes respectivement par

$$\frac{1}{S+A}, \quad \frac{1}{S+B}.$$

Aux termes de la cinquième colonne retranchons les termes de la troisième après multiplication par $\frac{1}{S+B}$.

Il vient

$$\begin{vmatrix} \frac{2}{3}[Kz^3 + C_s] & \frac{F_{10}}{S+A} & -\frac{F_{10}}{S+B} & Q_0 & P_0 \\ -F_{10}\left(\frac{1-\sigma_1}{\varepsilon_1}\right)z & \left(1+\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}z\right) & 0 & \left(\frac{1-\sigma_1}{\varepsilon_1}\right)z & 0 \\ F_{10}\left(\frac{1-\sigma_2}{\varepsilon_2}\right)z & 0 & \left(1+\frac{\sigma_2}{\varepsilon_2}z\right) & 0 & \left(\frac{1-\sigma_2}{\varepsilon_2}\right)z \\ rQ_0 & -\frac{r}{S+A} & 0 & z+\frac{r}{S+A} & \omega \\ -rP_0 & 0 & \frac{r}{S+B} & \omega & -\left(z+\frac{r}{S+B}\right) \end{vmatrix} = 0 \quad (5)$$

(*) LIÉNARD et CHIPART. Sur le signe de la partie réelle des racines d'une équation algébrique. *Journal des Mathématiques*, 6° série, t. X, fasc. IV, 1914, page 191.

Avec :

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= \left[-X_0 + \frac{F_{I0}}{S+B} \right] \\ Q_0 &= \left[Y_0 - \frac{F_{I0}}{S+A} \right] \\ C_s &= \frac{3}{2} [P_0 F_{I0} - Q_0 F_{I0}] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

C'est-à-dire en tenant compte des relations (6) 1^{re} partie).

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= \frac{F_0}{(S+A)} + F_{I0} \left(\frac{1}{S+B} - \frac{1}{S+A} \right) \\ Q_0 &= F_{I0} \left(\frac{1}{S+B} - \frac{1}{S+A} \right) \\ C_s &= \frac{3}{2} \left[\frac{F_0 \cdot F_{I0}}{S+A} + (F_{I0}^2 - F_0^2) \left(\frac{1}{S+B} - \frac{1}{S+A} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Cette dernière expression est comme nous le verrons ci-après, le couple synchronisant de la théorie élémentaire quand la résistance est négligeable. C'est pourquoi nous la désignons par C_s .

II. — ETUDE DES OSCILLATIONS LIBRES EN NÉGLIGEANT LA RÉSISTANCE DE L'INDUIT.

En faisant $r = 0$ dans l'équation caractéristique (5), on voit que les deux dernières lignes du déterminant se réduisent à leurs deux derniers termes, et en développant par rapport à la dernière ligne, il vient :

$$(z^2 + \omega^2) \begin{vmatrix} \frac{2}{3} [Kz^2 + C_s] & \frac{F_{I0}}{S+A} & -\frac{F_{I0}}{S+B} \\ -F_{I0} \left(\frac{1-\sigma_1}{\epsilon_1} \right) z & 1 + \frac{\sigma_1}{\epsilon_1} z & 0 \\ F_{I0} \left(\frac{1-\sigma_2}{\epsilon_2} \right) z & 0 & 1 + \frac{\sigma_2}{\epsilon_2} z \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

D'autre part quand r est nul, les formules du régime permanent (1^{re} partie formules 8) donnent :

$$F_{I0} = \frac{U \sqrt{2}}{\omega} \cos \psi \quad F_{I0} = \frac{U \sqrt{2}}{\omega} \sin \psi. \quad (9)$$

L'équation ci-dessus, développée, s'écrira : $(z^2 + \omega^2) = 0$
et

$$\left. \begin{aligned} \frac{2}{3} [Kz^2 + C_s] \left(1 + \frac{\sigma_1}{\epsilon_1} z \right) \left(1 + \frac{\sigma_2}{\epsilon_2} z \right) &+ \frac{2U^2 \sin^2 \psi}{(S+A)\omega^2} \frac{(1-\sigma_1)}{\epsilon_1} \left(1 + \frac{\sigma_2}{\epsilon_2} z \right) z \\ &+ \frac{2U^2 \cos^2 \psi}{(S+B)\omega^2} \frac{(1-\sigma_2)}{\epsilon_2} \left(1 + \frac{\sigma_1}{\epsilon_1} z \right) z = 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Avec d'après (7) et (9)

$$C_s = 3 \left[\frac{EU \cos \psi}{(S + A)\omega^2} + \frac{U^2}{\omega^2} (\cos^2 \psi - \sin^2 \psi) \left(\frac{1}{S + B} - \frac{1}{S + A} \right) \right] \quad (11)$$

Ainsi l'équation caractéristique du sixième degré se décompose en deux équations :

1° l'équation binôme $(z^2 + \omega^2) = 0$

2° l'équation du quatrième degré (10) qui ordonnée par rapport à z s'écrit :

$$\left. \begin{aligned} a_0 z^4 + a_1 z^3 + a_2 z^2 + a_3 z + a_4 &= 0 \quad \text{avec,} \\ a_0 &= K \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\varepsilon_1 \varepsilon_2} \quad a_1 = K \left(\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} + \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} \right) \\ a_2 &= K + C_s \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\varepsilon_1 \varepsilon_2} + \frac{3U^2 \sin^2 \psi}{(S + A)\omega^2} \left(\frac{1 - \sigma_1}{\varepsilon_2} \right) \frac{\sigma_2}{\varepsilon_1} + \frac{3U^2 \cos^2 \psi}{(S + B)\omega^2} \left(\frac{1 - \sigma_2}{\varepsilon_2} \right) \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \\ a_3 &= C_s \left(\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} + \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} \right) + \frac{3U^2 \sin^2 \psi}{(S + A)\omega^2} \left(\frac{1 - \sigma_1}{\varepsilon_1} \right) + \frac{3U^2 \cos^2 \psi}{(S + B)\omega^2} \left(\frac{1 - \sigma_2}{\varepsilon_2} \right) \\ a_4 &= C_s \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

L'oscillation libre comprendra donc :

1° Le mouvement correspondant à l'équation caractéristique du quatrième degré (10 ou 12) et que nous appellerons *oscillation lente* parce que, pratiquement, dans les machines usuelles, la période de ce mouvement est grande vis-à-vis de la période du courant.

2° L'oscillation donnée par $z^2 + \omega^2 = 0$ qui sera de la forme

$$a \cos \omega t + b \sin \omega t.$$

C'est une oscillation stationnaire de fréquence égale à celle du courant. Nous la distinguerons sous le nom de *vibration rapide*.

A. — OSCILLATION LENTE.

Analysons d'abord quelques cas particuliers.

Machine sans courants d'amortissement. — Ce serait le cas d'une machine sans circuits amortisseurs, à pôles entièrement feuilletés et dont l'excitation serait produite soit par des aimants permanents, soit par un circuit inducteur de très grande impédance ne livrant pas- sage à aucun courant d'amortissement appréciable.

On a alors d'après les équations (4) (4 bis) 1^{re} partie

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 1 \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \infty$$

et l'équation (10) se réduit à l'équation binôme du second degré

$$Kz^2 + C_s = 0. \quad (13)$$

Si $C_s < 0$ ou a deux racines réelles dont l'une est positive, la solution correspondante serait une exponentielle à exposant positif croissant indéfiniment avec t : la machine n'est pas stable. Donc la condition nécessaire de stabilité est : $C_s > 0$.

Si cette condition est remplie, l'équation admet les racines imaginaires :

$$z = \pm i \sqrt{\frac{C_s}{K}}$$

donnant une solution de la forme :

$$a \cos \left[\sqrt{\frac{C_s}{K}} t + \beta \right]$$

qui représente une oscillation sinusoïdale stationnaire, de fréquence :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_s}{K}} \quad (14)$$

Dans le cas particulier où les deux réactions de la machine sont égales

$$S + A = S + B = L$$

l'expression (11) de C_s se réduit à :

$$C_s = 3 \frac{EU \cos \psi}{L\omega^2}$$

et (14) donne alors :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EU \cos \psi}{KL\omega^2}} \quad (15)$$

Ces formules du couple synchronisant C_s et de la fréquence sont celles données par M. Boucherot en 1890.

Quand les deux réactions de la machine sont inégales, l'expression du couple synchronisant :

$$C_s = 3 \left[\frac{EU \cos \psi}{(S + A)\omega^2} + \frac{U^2}{\omega^2} (\cos^2 \psi - \sin^2 \psi) \left(\frac{1}{S + B} - \frac{1}{S + A} \right) \right]$$

contient le terme complémentaire :

$$\frac{U^2}{\omega^2} (\cos^2 \psi - \sin^2 \psi) \left(\frac{1}{S + B} - \frac{1}{S + A} \right)$$

dont le signe dépend du sens de l'inégalité des réactions et de la valeur de l'angle ψ .

On voit d'après ces résultats que l'inégalité des réactions modifie l'expression de la fréquence propre, mais n'introduit aucun élément d'amortissement. En l'absence de tout courant d'amortissement, et de résistance ohmique de l'induit, l'oscillation lente de la machine,

quelle que soit l'inégalité des réactions reste un mouvement inusoidal stationnaire. L'amplitude n'est pas décroissante, il n'y a pas stabilité de l'oscillation lente, au sens réel du mot.

Cette stabilité, comme nous allons le voir, n'est obtenue que par l'action des courants d'amortissement.

Machine avec circuits amortisseurs à coefficients de dispersion très faibles vis-à-vis des résistances. — On peut écrire dans ce cas :

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{z_1}{z_2} = 0.$$

L'équation caractéristique des oscillations lentes (10) s'abaisse comme dans le cas précédent, au deuxième degré, mais présente alors un terme d'amortissement en z .

Elle s'écrit :

$$Kz^2 + 2\lambda z + C_s = 0 \quad (16)$$

$$\lambda = \frac{3U^2}{2\omega^2} \left(\frac{\cos^2 \psi}{(S+B)\varepsilon_2} + \frac{\sin^2 \psi}{(S+A)\varepsilon_1} \right) \quad (17)$$

Si $C_s < 0$, l'équation a une racine réelle positive à laquelle correspondra un mouvement apériodique croissant, donc le fonctionnement sera instable.

Si $C_s > 0$ et $\frac{\lambda^2}{K} < C_s$, les solutions sont complexes avec partie réelle négative :

$$z = -\frac{\lambda}{K} \pm i \sqrt{\frac{C_s}{K} - \frac{\lambda^2}{K^2}}.$$

Donc on aura une oscillation lente amortie de la forme :

$$a.e^{-\frac{\lambda t}{K}} \cos \left(\sqrt{\frac{C_s}{K} - \frac{\lambda^2}{K^2}} t + \beta \right)$$

dont la fréquence sera :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_s}{K} - \frac{\lambda^2}{K^2}}$$

et le décrement $-\frac{\lambda}{K}$.

Si le couple d'amortissement λ est très élevé, on peut avoir :

$$\frac{\lambda^2}{K} > C_s,$$

on a alors deux racines réelles négatives, le système cesse d'être oscillatoire, le mouvement périodique fait place à deux mouvements apériodiques amortis.

Cas général. — Revenons à l'équation générale (10) ou (12).

On voit aisément par les substitutions :

$$-\infty, \quad -\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1}, \quad -\frac{\varepsilon_1}{\sigma_2},$$

faites dans la forme (10), que cette équation aura au moins *deux racines réelles négatives*, l'une entre les deux quantités

$$-\frac{\varepsilon_1}{\sigma_2}, \quad -\frac{\varepsilon_2}{\sigma_3},$$

l'autre inférieure à la plus petite de ces deux quantités,

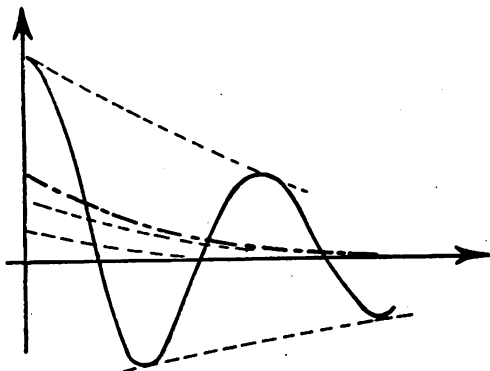


Figure 7.

Ces racines donneront deux mouvements apériodiques toujours amortis :

$$b_1 e^{-z_1 t}, \quad b_2 e^{-z_2 t},$$

Les deux autres racines seront en général complexes et donneront une oscillation de la forme :

$$a e^{-nt} \cos(\nu t + \beta).$$

L'oscillation lente totale aura donc comme expression :

$$a e^{-nt} \cos(\nu t + \beta) + b_1 e^{-z_1 t} + b_2 e^{-z_2 t}$$

et sera représentée graphiquement par une courbe telle que celle de la figure 7. Toutefois, si l'amortissement est très puissant les deux racines complexes peuvent faire place à deux racines réelles et l'oscillation comprend alors quatre termes exponentiels.

Condition de stabilité de l'oscillation lente. — Il faut, comme nous l'avons dit précédemment, que toutes les racines de l'équation caractéristique soient pseudo-négatives.

D'après l'étude précitée de MM. LIÉNARD et CHIPART, les conditions nécessaires et suffisantes pour que l'équation du quatrième degré :

$$a_0 x^4 + a_1 x^3 + a_2 x^2 + a_3 x + a_4 = 0$$

ait toutes ses racines pseudo-négatives, sont :

$$\left. \begin{aligned} a_0 a_1 > 0 \quad a_0 a_2 > 0 \quad a_0 a_3 > 0 \\ a_0 a_3 (a_1 a_2 - a_0 a_3) - a_0 a_1^2 a_4 > 0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Appliquons ces conditions à l'équation (12).

Le coefficient a_0 est positif. La condition $a_0 a_1 > 0$ donne $a_1 = C_s > 0$.

L'expression du coefficient a_2 montre que la deuxième condition $a_2 > 0$ sera toujours remplie si la première l'est.

La troisième condition $a_1 > 0$ est toujours vérifiée. Il ne reste finalement que les deux conditions :

$$\text{et} \quad \left. \begin{aligned} C_s > 0 \\ a_3 (a_1 a_2 - a_0 a_3) - a_1^2 a_4 > 0 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Les formules (12) donnent :

$$(a_1 a_2 - a_0 a_3) = K^2 \left(\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} + \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} \right) + C_s \cdot K \left(\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} + \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} \right) \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\varepsilon_1 \varepsilon_2} + T_1 - C_s K \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \right) \left(\frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2} \right).$$

Les deux termes en C_s s'annulent; T_1 représente un ensemble de termes toujours positifs.

En multipliant par a_3 il vient :

$$a_3 (a_1 a_2 - a_0 a_3) = C_s K^2 \left(\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} + \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} \right)^2 + C_s T_1 \left(\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} + \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} \right) + T_2$$

T_2 étant essentiellement positif.

D'autre part on a :

$$a_1^2 a_4 = C_s K^2 \left(\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} + \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} \right)^2.$$

Donc la deuxième condition (19) se traduit par :

$$C_s T_1 \left(\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} + \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} \right) + T_2 > 0.$$

Elle est toujours réalisée quand la première condition $C_s > 0$ est remplie.

Ainsi la seule condition nécessaire et suffisante de stabilité des oscillations lentes est :

$$C_s = 3 \left[\frac{EU \cos \psi}{(S+A)\omega^2} + \frac{U^2}{\omega^2} (\cos^2 \psi - \sin^2 \psi) \left(\frac{1}{S+B} - \frac{1}{S+A} \right) \right] > 0. \quad (20)$$

Si nous représentons par x et y les coordonnées de l'extrémité D du diagramme de Blondel, on aura :

$$\begin{aligned} x &= E \cos \psi \\ y &= E \sin \psi \end{aligned}$$

et la condition de stabilité ci-dessus s'écrit en multipliant par E^2

$$\frac{U}{(S+A)\omega^2} x(x^2 + y^2) + \frac{U^2}{\omega^2} \left(\frac{1}{S+B} - \frac{1}{S+A} \right) (x^2 - y^2) > 0.$$

U étant fixe, si on admet que $(S+B)$ et $(S+A)$ sont invariables

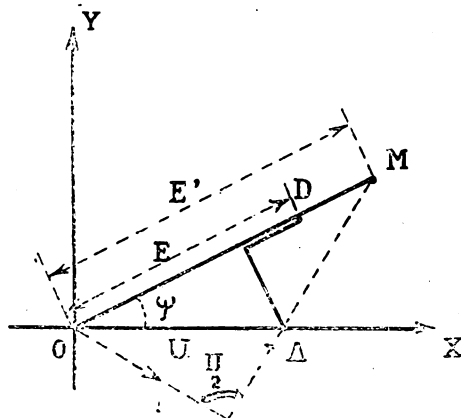


Figure 8.

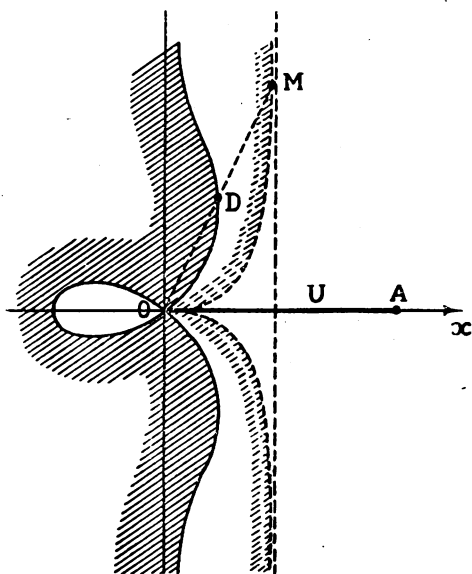


Figure 9.

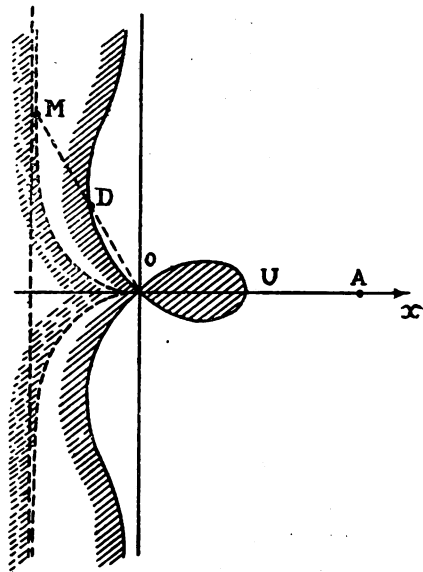


Figure 9 bis

dans tout le plan, cette expression représente une *strophoïde* qui limite le domaine de stabilité.

Si $(S+A) > (S+B)$ on a le cas (figure 9).

Si $(S+A) < (S+B)$ on a le cas (figure 9 bis).

Pour que le fonctionnement soit stable, il faut que le point D soit dans la région non hachurée.

Si au lieu de considérer le point D extrémité du vecteur E, on envisage le point M qui est obtenu en traçant AM perpendiculairement au courant, et qui donne le vecteur $E' = OM$ que M. Blondel appelle force électro-motrice joubertique, on peut aisément exprimer C_s en fonction des coordonnées de ce point M.

On a :

$$E' = U \sqrt{2} \cos \psi - (S + B) \omega X_0$$

$$E = U \sqrt{2} \cos \psi - (S + A) \omega X_0$$

d'où, en éliminant X_0

$$\frac{E'}{S + B} = \frac{E}{S + A} + U \sqrt{2} \cos \psi \left(\frac{1}{S + B} - \frac{1}{S + A} \right).$$

Et par suite l'expression (20) s'écrira :

$$C_s = 3 \left[\frac{E' \cdot U \cos \psi}{(S + B) \omega^2} - \frac{U^2}{\omega^2} \sin^2 \psi \left(\frac{1}{S + B} - \frac{1}{S + A} \right) \right] > 0.$$

On voit donc en faisant apparaître les coordonnées cartésiennes du point M qui sont :

$$x' = E' \cos \psi \quad y' = E' \sin \psi$$

que la condition de stabilité exprime que le point M est à droite de la *cissoïde* d'équation :

$$\frac{U}{(S + B) \omega^2} x' (x'^2 + y'^2) - \frac{U^2}{\omega^2} \left(\frac{1}{S + B} - \frac{1}{S + A} \right) y'^2 = 0.$$

Pour terminer cette étude des oscillations lentes, nous indiquerons deux cas particuliers où l'équation caractéristique s'abaisse au 3^e degré.

a) *Machine sans courant d'amortissement transversal.*

$$\sigma_2 = 1 \quad \varepsilon_2 = \infty.$$

Ce serait le cas d'une machine à pôles feuilletés, sans circuits amortisseurs, amortie uniquement par les courants variables pouvant prendre naissance dans le circuit d'excitation.

L'équation caractéristique (10) devient

$$\frac{2}{3} (K z^2 + C_s) \left(1 + \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} z \right) + \frac{2U^2 \sin^2 \psi}{(S + A) \omega^2} \left(\frac{1 - \sigma_1}{\varepsilon_1} \right) z = 0.$$

Elle est du 3^e degré.

Il y aura toujours une racine réelle négative comprise entre 0

et $-\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1}$.

Les deux autres racines seront imaginaires conjuguées (si l'amortissement n'est pas trop puissant), et l'oscillation libre sera de la forme :

$$ae^{-nt} \cos(\gamma t + \beta) + b_1 e^{-\varepsilon_1 t}.$$

b) *Machines avec coefficients d'amortissement égaux.*

$$\sigma_1 = \sigma_2, \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_2.$$

Ce serait le cas d'une machine munie d'un excellent circuit amortisseur en cage d'écureuil.

L'équation caractéristique (10) s'écrit dans ce cas :

$$\left(1 + \frac{\sigma}{\varepsilon} z\right) \left[\frac{2}{3} (Kz^2 + C_r) \left(1 + \frac{\sigma}{\varepsilon} z\right) + 2\lambda (1 - \sigma) z\right] = 0.$$

La racine $z = -\frac{\varepsilon}{\sigma}$ est mise en évidence, et il reste une équation du 3^e degré.

B. — VIBRATION RAPIDE DE PULSATION ω .

On remarque tout d'abord que la vibration rapide de même fréquence que le courant, donnée par le facteur $[z^2 + \omega^2]$ de l'équation caractéristique (8) n'est pas amortie par les courants d'amortissement qui n'agissent que sur l'oscillation lente. Son amplitude est stationnaire. Nous verrons ci-après qu'en réalité cette vibration est amortie par l'influence de la résistance d'induit que nous négligeons dans ce chapitre.

L'examen du déterminant (3) montre que le facteur $(z^2 + \omega^2)$ est introduit par les équations différentielles (15 bis, 1^{re} partie).

Quand on fait $r = 0$, ces équations peuvent s'écrire en groupant les termes en $\frac{d}{dt}$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} [\Delta F_l + F_{l0} \Delta \theta] + \omega [\Delta F_l - F_{l0} \Delta \theta] &= -\Sigma \Delta u \cos \theta_0 \\ -\frac{d}{dt} [\Delta F_l - F_{l0} \Delta \theta] + \omega [\Delta F_l + F_{l0} \Delta \theta] &= \Sigma \Delta u \sin \theta_0. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Elles sont intégrables indépendamment des autres équations différentielles et donnent :

$$\left. \begin{aligned} \Delta F_l + F_{l0} \Delta \theta &= a \cos \omega t + b \sin \omega t + \chi_1(t) \\ \Delta F_l - F_{l0} \Delta \theta &= -b \cos \omega t + a \sin \omega t + \chi_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

χ_1 , χ_2 , étant les intégrales particulières correspondant aux Δu des seconds membres.

Les termes de pulsation ω sont mis ainsi directement en évidence. En portant ces valeurs de ΔF_l , ΔF_r dans les autres équations différentielles (12) (13), on déterminera les vibrations rapides de $\Delta \theta$, ΔX , ΔY , en fonction des deux constantes a et b .

Nous allons montrer que la vibration rapide n'apparaît dans l'oscillation libre que si la tension aux bornes de la machine subit des variations.

En effet, exprimons les variations des flux dans les phases de l'induit à l'aide des valeurs (22).

On a (1^{re} partie (2.)

$$f = F_l \cos \theta + F_r \sin \theta$$

d'où

$$\Delta f = (\Delta F_l + F_{l0} \Delta \theta) \cos \theta_0 + (\Delta F_r - F_{r0} \Delta \theta) \sin \theta_0$$

donc pour les trois phases:

$$\Delta f_1 = (\Delta F_l + F_{l0} \Delta \theta) \cos \omega t + (\Delta F_r - F_{r0} \Delta \theta) \sin \omega t$$

$$\Delta f_2 = (\Delta F_l + F_{l0} \Delta \theta) \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + (\Delta F_r - F_{r0} \Delta \theta) \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$\Delta f_3 = \dots \dots \dots$$

Et, par suite, d'après les valeurs (22).

$$\Delta f_1 = a + \chi_1(t) \cos \omega t + \chi_2(t) \sin \omega t$$

$$\Delta f_2 = -\frac{a}{2} - \frac{b}{2} \sqrt{3} + \chi_1(t) \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + \chi_2(t) \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} \right)$$

$$\Delta f_3 = -\frac{a}{2} + \frac{b}{2} \sqrt{3} + \chi_1(t) \cos \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} \right) + \chi_2(t) \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} \right).$$

Mais les flux f_1 , f_2 , f_3 , sont des grandeurs nécessairement continues; donc à l'instant initial t_0 où commenceront les oscillations, on aura toujours:

$$\Delta f_1 = \Delta f_2 = \Delta f_3 = 0.$$

Ce qui donnera:

$$0 = a + \chi_1(t_0) \cos \omega t_0 + \chi_2(t_0) \sin \omega t_0$$

$$0 = -\frac{a}{2} - \frac{b}{2} \sqrt{3} + \chi_1(t_0) \cos \left(\omega t_0 + \frac{2\pi}{3} \right) + \dots$$

$$0 = -\frac{a}{2} + \frac{b}{2} \sqrt{3} + \dots$$

Ces relations déterminent les amplitudes a et b de la vibration rapide.

Si la tension aux bornes de la machine ne subit aucune variation on a:

$$\Delta u_1 = \Delta u_2 = \Delta u_3 = 0$$

les seconds membres de (21) sont nuls. Donc :

$$\chi_1(t) = 0 \quad \chi_2(t) = 0.$$

Et par suite les relations ci-dessus donnent :

$$a = 0 \quad b = 0.$$

La vibration rapide n'existe pas.

Ce résultat est évidemment subordonné à l'absence de résistances dans l'induit.

Dans les machines réelles, cette résistance d'induit est faible, mais ne peut être entièrement négligée. On voit de suite en reprenant les équations (15 bis, 1^{re} partie), que pour toute variation lente du courant, la résistance fait apparaître dans ces équations des

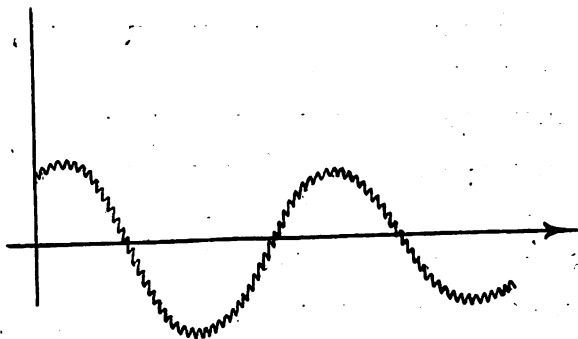


Figure 10.

termes en $r \Delta X$, $r \Delta Y$, $\Delta \theta$... qui agiront comme des variations de tension aux bornes et feront naître par conséquent des vibrations rapides.

Donc l'oscillation lente provoquée par des variations de couple ou d'excitation sera toujours accompagnée de vibrations rapides. Toutefois, celles-ci seront faibles par suite de la petitesse des termes en $r \Delta X$, $r \Delta Y$,...

Les vibrations rapides ne prendront de l'importance que dans les oscillations provoquées par des variations de tension.

Enfin une dernière remarque s'impose en ce qui concerne l'amplitude de la vibration rapide au point de vue cinématique.

Dans les équations (2—2^e partie) servant au calcul des amplitudes a , λa , $\lambda' a$,... des variations $\Delta \theta$, ΔY ,... ΔF ... le terme d'inertie du rotor Kz^2 prend pour la vibration rapide de pulsation ω , la valeur $-K\omega^2$, qui, avec les fréquences employées dans les machines usuelles sera très grande vis-à-vis des autres coefficients.

Il s'ensuit que la résolution de ces équations donnera une amplitude a de la vibration rapide $\Delta\theta$ qui sera très petite vis-à-vis des amplitudes $\lambda a, \lambda' a, \dots$, des vibrations rapides des grandeurs électriques, $\Delta X, \Delta Y, \Delta F, \dots$

On peut, en résumé, dire que la vibration rapide est surtout une *oscillation électrique* des courants et des flux, qui ne prend de l'importance que dans les oscillations provoquées par des variations de tension et reste toujours très peu sensible dans la variable cinématique $\Delta\theta$.

Si on représente graphiquement les oscillations $\Delta\theta$ du rotor, les vibrations rapides ne se traduiront donc que par de très fines dentelures s'ajoutant à la courbe des oscillations lentes.

Troisième Partie.

I. — ETUDE DES OSCILLATIONS LIBRES D'UNE MACHINE SANS COURANTS D'AMORTISSEMENT, EN TENANT COMPTE DE LA RÉSISTANCE DE L'INDUIT

Ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, l'absence de courants d'amortissement correspondrait au cas limite d'une machine à circuit magnétique entièrement feuilleté, sans amortisseurs, et dont le champ inducteur serait obtenu par aimantation permanente ou par un circuit d'excitation de très grande inductance.

Elle se traduit par les conditions :

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 1 \text{ et } \epsilon_1 = \epsilon_2 = \infty.$$

L'équation caractéristique (5) (2^e partie) s'abaisse alors au 4^e degré et s'écrit

$$\begin{vmatrix} \frac{2}{3}(K_z^2 + C_s) & Q_0 & P_0 \\ rQ_0 & \left(z + \frac{r}{S+A}\right) & \omega \\ rP_0 & -\omega & \left(z + \frac{r}{S+B}\right) \end{vmatrix} = 0$$

c'est-à-dire :

$$\left[z^2 + \frac{C_s}{K}\right] \left[z^2 + zr \left(\frac{1}{S+A} + \frac{1}{S+B}\right) + \omega^2 + \frac{r^2}{(S+A)(S+B)}\right] - \frac{3}{2} \frac{r}{K} (P_0^2 + Q_0^2) z - \frac{3}{2} \frac{r^2}{K} \left(\frac{P_0^2}{(S+A)} + \frac{Q_0^2}{(S+B)}\right) = 0. \quad (4)$$

Pour l'étude de cette équation, nous poserons :

$$\left. \begin{aligned} \frac{z}{\omega} = z' \quad \frac{r^2}{(S+A)(S+B)\omega^2} = \operatorname{tg}^2 \alpha \quad \frac{S+B}{S+A} = \lambda^2 \\ \frac{3}{2} (S+A) (P_0^2 + Q_0^2) = N_1 \\ \frac{3}{2} (P_0^2 (S+B) + Q_0^2 (S+A)) = N_0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

D'après les formules (7 — 2^e partie) donnant les valeurs de P_0 , Q_0 , C_s , on voit que les expressions N_0 , N_1 , seront du même ordre de grandeur que C_s . Il vient avec ces nouvelles notations

$$\left[z'^2 + \frac{C_s}{K\omega^2} \right] \left[z'^2 \cos^2 \alpha + z' \sin 2\alpha \left(\frac{\lambda^2 + 1}{2\lambda} \right) + 1 \right] - z' \frac{N_0}{K\omega^2} \cdot \frac{\lambda}{2} \sin 2\alpha - \frac{N_1}{K\omega^2} \sin^2 \alpha = 0 \quad (3)$$

ou encore en ordonnant suivant les puissances de z'

$$\left. \begin{aligned} a_0 z'^4 + a_1 z'^3 + a_2 z'^2 + a_3 z' + a_4 &= 0 \\ a_0 &= \cos^2 \alpha, \quad a_1 = \sin 2\alpha \left(\frac{\lambda^2 + 1}{2\lambda} \right) \\ a_2 &= 1 + \frac{C_s}{K\omega^2} \cos^2 \alpha \\ a_3 &= \sin 2\alpha \left[\frac{C_s}{K\omega^2} \left(\frac{\lambda^2 + 1}{2\lambda} \right) - \frac{N_1}{K\omega^2} \cdot \frac{\lambda}{2} \right] \\ a_4 &= \frac{C_s}{K\omega^2} - \frac{N_0}{K\omega^2} \sin^2 \alpha \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

On voit que le couple synchronisant de la théorie élémentaire donné par le terme constant de l'équation caractéristique devient ici :

$$[C_s - N_0 \sin^2 \alpha]$$

c'est-à-dire d'après les expressions de C_s et de N_0

$$\frac{3}{2} \left[(P_0 F_0 - Q_0 F_0) - \sin^2 \alpha (P_0^2 (s+B) + Q_0^2 (s+A)) \right]$$

Calcul approché des racines de l'équation caractéristique. — Dans les machines usuelles, les coefficients

$$\frac{C_s}{K\omega^2}, \frac{N_0}{K\omega^2}, \frac{N_1}{K\omega^2},$$

entrant dans l'équation (3) sont très petits par rapport à l'unité. Il en résulte que cette équation admettra deux racines dont les valeurs approchées seront données par le trinôme :

$$T = z'^2 \cos^2 \alpha + z' \sin 2\alpha \left(\frac{\lambda^2 + 1}{2\lambda} \right) + 1 = 0.$$

En effet, en divisant (3) par le facteur $\left[z'^2 + \frac{C_s}{K\omega}\right]$ l'équation s'écrit :

$$T - z' \frac{N_1}{K\omega^2} \frac{\lambda \sin \alpha \cos \alpha}{\left[z'^2 + \frac{C_s}{K\omega^2}\right]} - \frac{N_0}{K\omega^2} \frac{\sin^2 \alpha}{\left[z'^2 + \frac{C_s}{K\omega^2}\right]} = 0.$$

On remarque que les racines du trinôme T sont de l'ordre de grandeur de l'unité. Il en sera de même du facteur $\left[z'^2 + \frac{K\omega^2}{C_s}\right]$ situé au dénominateur des deux termes qui suivent ce trinôme. Donc ces deux termes qui ont en coefficients les rapports très petits $\frac{N_0}{K\omega^2}$, $\frac{N_1}{K\omega^2}$, seront négligeables vis-à-vis des termes de T.

Les valeurs des racines données par $T = 0$ seront

$$z = -\omega \operatorname{tg} \alpha \cdot \left(\frac{\lambda^2 + 1}{2\lambda}\right) \pm i\omega \sqrt{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha \left(\frac{\lambda^2 - 1}{2\lambda}\right)^2}.$$

La partie réelle de ces racines étant toujours négative, l'oscillation correspondante est convergente. Ce sera une vibration rapide de pulsation :

$$\left. \begin{aligned} \nu &= \omega \sqrt{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha \left(\frac{\lambda^2 - 1}{2\lambda}\right)^2} \\ \text{et de décrément :} \quad \gamma &= \omega \operatorname{tg} \alpha \left(\frac{\lambda^2 + 1}{2\lambda}\right). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Quant r est nul, α est nul également, et on retrouve dans cette solution la vibration rapide stationnaire de pulsation ω obtenue au chapitre précédent.

Donc la résistance de l'induit a pour effet :

- 1° d'amortir la vibration rapide de la machine.
- 2° d'abaisser la fréquence de cette vibration, qui ne reste exactement égale à la fréquence du courant que si $\lambda = 1$, c'est-à-dire si les réactions de la machine sont égales.

Pour obtenir les deux autres racines de l'équation caractéristique, divisons (3) par le trinôme T. Il vient :

$$z'^2 + \frac{C_s}{K\omega^2} - \frac{1}{K\omega^2} \left(\frac{N_0 \sin^2 \alpha + N_1 \lambda \sin \alpha \cos \alpha z'}{T} \right) = 0.$$

Effectuons la division par T suivant les puissances croissantes de z' . On obtient :

$$\begin{aligned} z'^2 + \frac{C_s}{K\omega^2} - \frac{N_0 \sin^2 \alpha}{K\omega^2} - \frac{\lambda \sin^2 \alpha}{2K\omega^2} \left[N_1 - N_0 \sin^2 \alpha \cdot \left(\frac{\lambda^2 + 1}{\lambda^3}\right) \right] z' \\ - \frac{1}{K\omega^2} B z'^2 + \dots \text{etc.} = 0. \end{aligned}$$

Abstraction faite du premier terme z'^2 , les coefficients de ce développement sont tous très petits puisqu'ils contiennent $K\omega^2$ en dénominateur. Donc les racines z' que nous cherchons seront également très petites, et par suite pour calculer leurs valeurs approchées, on peut négliger les termes en z'^3 , z'^4 , etc... Le terme $\frac{1}{K\omega^2} B z'^2$ lui-même sera négligeable devant le premier terme z'^2 .

Il viendra simplement

$$\left. \begin{aligned} z'^2 + \frac{2B}{\omega} z' + \frac{D}{\omega^2} &= 0 \\ \text{avec} \quad B &= \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{\sin 2\alpha}{K\omega} \left[N_0 \left(\frac{\lambda^2 + 1}{\lambda^2} \right) \sin^2 \alpha - N_1 \right] \\ D &= \frac{1}{K} [C_s - N_0 \sin^2 \alpha] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

et les valeurs approchées des racines seront :

$$z = -B \pm i \sqrt{D - B^2}.$$

En faisant $r = 0$, c'est-à-dire $\alpha = 0$

il vient :

$$B = 0 \quad D = \frac{C_s}{K}$$

et on retrouve les racines

$$z^2 = -\frac{C_s}{K}$$

correspondant à l'oscillation lente stationnaire du chapitre précédent (formule de Boucherot).

Instabilité de l'oscillation lente. — L'oscillation libre totale se composera donc de la vibration rapide (6) toujours convergente, et de l'oscillation lente correspondant aux valeurs de z que nous venons d'obtenir. Pour que cette oscillation lente soit stable, il faut que l'on ait :

$$D > 0 \quad \text{et} \quad B > 0$$

c'est-à-dire :

$$\left. \begin{aligned} C_s - N_0 \sin^2 \alpha &> 0 \\ \text{et} \quad N_0 \left(\frac{\lambda^2 + 1}{\lambda^2} \right) \sin^2 \alpha - N_1 &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Dans les machines usuelles, la résistance de l'induit r est très faible par rapport aux inductances $(S + A)\omega$, $(S + B)\omega$, et l'angle α défini par :

$$\operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{r^2}{(S + A)(S + B)\omega^2}$$

a une valeur très petite. Il s'ensuit que la deuxième condition de stabilité ne sera pas remplie, car le terme positif : $N_0 \left(\frac{\lambda^2 + 1}{\lambda^2} \right) \sin^2 \alpha$ sera beaucoup plus petit que le terme négatif N_1 .

On aura $B < 0$ et l'oscillation sera instable.

On a ainsi le résultat suivant :

Une machine, sans circuits d'amortissement, est instable. La résistance de l'induit, dont les valeurs usuelles sont faibles, amortit bien la vibration rapide, mais au lieu d'amortir également l'oscillation lente, comme on pourrait le penser à priori, rend cette oscillation divergente (1).

La stabilité ne peut apparaître que pour de très grandes valeurs de la résistance, donnant

$$\sin^2 \alpha > \frac{N_1}{N_0} \left(\frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 1} \right).$$

Conditions exactes de stabilité. — Les résultats que nous venons d'obtenir ne sont qu'une première approximation basée sur la petitesse des coefficients $\frac{C_s}{K \omega^2}$, $\frac{N_0}{K \omega^2}$, $\frac{N_1}{K \omega^2}$, qui nous a permis de décomposer l'équation du 4^e degré en deux trinômes du second degré. Mais il est aisé de former les conditions exactes de stabilité, en écrivant directement les conditions nécessaires et suffisantes pour que l'équation caractéristique du 4^e degré (4) ait toutes ses racines pseudo-négatives.

Ces conditions sont :

$$\begin{aligned} a_0 a_4 &> 0, & a_0 a_2 &> 0, & a_1 a_1 &> 0, \\ a_0 a_3 (a_1 a_2 - a_0 a_3) - a_0 a_1^2 a_4 &> 0. \end{aligned}$$

En portant dans ces inégalités les valeurs (4) on remarque que la troisième condition est toujours vérifiée. La deuxième condition l'est nécessairement si la première est remplie. Il ne reste donc que la première et la quatrième condition qui donnent :

$$\left. \begin{aligned} C_s - N_0 \sin^2 \alpha &> 0 \\ \frac{N_1}{K \omega^2} \cos^2 \alpha \left(C_s - N_1 \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 1} \right) + N_0 \left(\frac{\lambda^2 + 1}{\lambda^2} \right) \sin^2 \alpha - N_1 &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

(1) Cette instabilité provoquée par la résistance de l'induit, nous a été signalée en 1921 par M. Henri Chipart, directeur de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, qui l'avait démontrée, comme nous l'avons dit au début de cet article, dans une étude en date de 1917.

On voit qu'en négligeant les termes en $\frac{N_1}{K\omega^2}$, on retrouve la deuxième condition approchée (8), et on vérifie bien que cette condition exacte de stabilité, pour les petites valeurs de $\frac{N_1}{K\omega^2}$ et de α ne sera pas satisfaite.

L'étude complète de ces conditions de stabilité en fonction des données de fonctionnement : tension et excitation, exigerait que l'on exprimât C , N_0 , N_1 en fonction de E , U , ψ , à l'aide des formules (2°-3° parties) (7, 2° parties) et (9°, 1° partie). On aboutirait dans le cas général où les réactions de la machine sont inégales, à des expressions fort complexes dont la discussion serait inextricable. Nous nous contenterons de discuter le cas relativement simple où les deux réactions sont égales, et de retrouver les résultats obtenus par M. Chipart dans l'étude inédite précitée.

Machine à réactions égales —

On a :

$$(S + A) = (S + B) = L$$

$$\lambda = 1, \quad \operatorname{tg} \omega = \frac{r}{L\omega}$$

La formule (9 ter 1° partie) donne

$$F_{10} = \frac{U\sqrt{2}}{\omega} \cos \alpha \cos (\psi - \alpha) + \frac{E\sqrt{2}}{\omega} \sin^2 \alpha$$

et les formules (7, 2° partie) donnent :

$$\left. \begin{aligned} Q_0 &= 0 & P_0 &= \frac{E\sqrt{2}}{L\omega} \\ C_1 &= \frac{3EU}{L\omega^2} \cos \alpha \cos (\psi - \alpha) + \frac{3E^2}{L\omega^2} \sin^2 \alpha \\ N_0 &= N_1 = \frac{3E^2}{L\omega^2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

donc on aura d'après (2) :

Avec ces valeurs, le trinôme T , donnant la vibration rapide s'écrit :

$$\frac{z^2}{\omega^2} \cos^2 \alpha + \frac{z}{\omega} \sin 2\alpha + 1 = 0$$

et ses racines sont :

$$z = -\omega \operatorname{tg} \alpha \pm i\omega$$

c'est-à-dire

$$z = -\frac{r}{L} \pm i\omega.$$

Donc la vibration rapide reste de pulsation ω , et son décrement est égal au rapport $\frac{r}{L}$.

L'équation approchée des petites racines (7) s'écrit :

$$z^2 + 2Bz + D = 0$$

avec

$$B = -\frac{3E^2}{4KL\omega^3} \sin 2\alpha \cos 2\alpha$$

$$D = \frac{3EU}{KL\omega^2} \cos \alpha \cos (\psi - \alpha).$$

La 1^{re} condition de stabilité $D > 0$ devient ainsi

$$\cos (\psi - \alpha) > 0. \quad (11)$$

C'est la condition classique donnée dans les exposés élémentaires de la question de stabilité.

Sur le diagramme de Blondel, elle élimine le domaine situé à gauche de la droite yoy' (fig. 11) faisant un angle $\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)$ avec U

La deuxième condition approchée $B > 0$ donne :

$$-\sin 2\alpha \cos 2\alpha > 0 \quad (12)$$

c'est-à-dire

$$\sin 4\alpha < 0$$

d'où

$$\alpha > \frac{\pi}{4} \quad r > L\omega.$$

D'après cette condition, la stabilité n'apparaîtrait que pour $r > L\omega$.

Pour les valeurs de la résistance inférieure à $L\omega$, on aurait instabilité. La divergence de l'oscillation lente proportionnelle à b , c'est-à-dire à $\sin 4\alpha$, serait nulle pour $r = 0$ croîtrait avec r , passerait par un maximum pour $\alpha = \frac{\pi}{8}$, c'est-à-dire

$$r = L\omega \operatorname{tg} \frac{\pi}{8} = L\omega . 0,414$$

puis décroîtrait pour s'annuler quand $r = L\omega$.

La condition exacte de stabilité (9) modifie un peu ces résultats.

Elle s'écrit avec les valeurs (10)

$$2EU \cos^3 \alpha \cos (\psi - \alpha) - E^2 \cos^2 \alpha \cos 2\alpha - \frac{2}{3} KL\omega^4 \cos 2\alpha > 0. \quad (13)$$

Quand $\cos 2\alpha$ est négatif, c'est-à-dire $\alpha > 45^\circ$ donc $r > L\omega$, cette condition est toujours satisfaite. Il y a stabilité dans toute la région définie par la première condition : $\cos(\psi - \alpha) > 0$.

Quand r est inférieur à $L\omega$ et $\cos 2\alpha$ positif, posons, pour interpréter géométriquement la condition :

$$x = E \cos(\psi - \alpha) \quad y = E \sin(\psi - \alpha)$$

x et y seront sur le diagramme de Blondel les coordonnées du point D par rapport aux axes ox , oy (fig. 11).

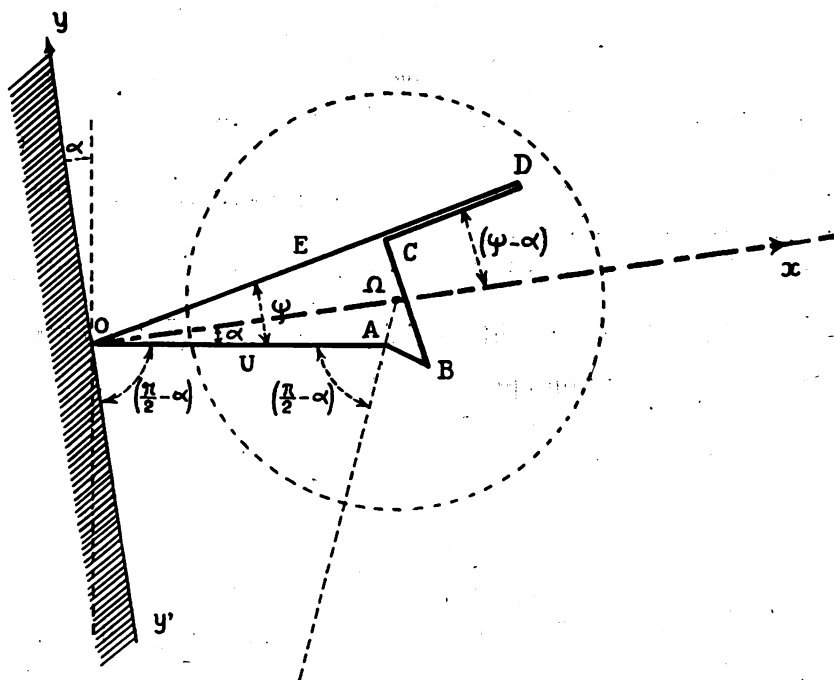


Figure 11.

Il vient en divisant (13) par la quantité positive $\cos 2\alpha$, et en changeant le signe du premier membre :

$$\cos^2 \alpha (x^2 + y^2) - 2U \frac{\cos^3 \alpha}{\cos 2\alpha} x + \frac{2}{3} KL\omega^4 < 0$$

c'est-à-dire :

$$y^2 + \left[x - \frac{U \cos \alpha}{\cos 2\alpha} \right]^2 - \frac{U^2}{\cos^2 \alpha} \left[\frac{\cos^4 \alpha}{\cos^2 2\alpha} - \frac{2}{3} \frac{KL\omega^4}{U^2} \right] < 0. \quad (14)$$

Cette condition définit la région située à l'intérieur d'une circonférence de centre Ω , d'abscisse

$$O\Omega = \frac{U \cos \alpha}{\cos 2\alpha} \quad (\text{figure 11})$$

et de rayon

$$R^2 = \frac{U^2}{\cos^2 \alpha} \left[\frac{\cos^4 \alpha}{\cos^2 2\alpha} - \frac{2}{3} \frac{KL\omega^4}{U^2} \right]. \quad (15)$$

On remarque que le rayon de ce cercle sera nul pour une valeur α_m comprise entre 0 et $\frac{\pi}{4}$, définie par

$$\frac{\cos^4 \alpha_m}{\cos^2 2\alpha_m} = \frac{2}{3} \frac{KL\omega^4}{U^2} \quad (16)$$

et que le cercle n'existera réellement que si R^2 est positif, c'est-à-dire si α est compris entre α_m et $\frac{\pi}{4}$.

Pour les valeurs de α inférieures à α_m , l'expression de R^2 est négative, il n'y a pas de cercle réel, le premier membre de (14) se compose de trois termes positifs et la condition de stabilité ne peut être satisfaite.

Donc :

pour $r < L\omega \operatorname{tg} \alpha_m$ il y a instabilité du fonctionnement

pour r compris entre $L\omega \operatorname{tg} \alpha_m$ et $L\omega$ il y a stabilité dans la région à l'intérieur de la circonférence définie ci-dessus

pour $r > L\omega$, il y a stabilité dans toute la région à droite de $y \cdot y'$

Dans les machines usuelles, le second membre de l'égalité (16) qui définit α_m , contenant $K\omega^4$ au numérateur, est très grand, et par suite

la valeur α_m sera très voisine de $\frac{\pi}{4}$.

La zone des valeurs de r dans laquelle intervient la circonférence (14) est donc très étroite, et sans intérêt pratique.

En faisant abstraction de cette zone, c'est-à-dire en confondant α_m et $\frac{\pi}{4}$, on retrouve les résultats donnés ci-dessus par la condition approchée de stabilité (12).

II. — CAS GÉNÉRAL OÙ L'ON TIENT COMPTE À LA FOIS DES COURANTS D'AMORTISSEMENT ET DE LA RÉSISTANCE DE L'INDUIT.

Du rapprochement des résultats des chapitres précédents où l'on a analysé séparément l'influence des courants d'amortissement et de la résistance de l'induit, on peut déduire, sans entreprendre une étude directe du cas général, qui serait fort ardue, que l'équation caractéristique du 6^e degré aura en pratique :

1° Deux racines imaginaires conjuguées de la forme :

$$-n \pm i \omega'$$

qui donneront une *vibration rapide* amortie de pulsation ω' voisine de la pulsation ω du réseau ;

2° Quatre racines formant ce que nous avons appelé l'*oscillation lente*.

Deux de ces racines, introduites par les constantes de temps des courants d'amortissement, seront généralement réelles et négatives, et donneront des mouvements apériodiques amortis.

Les deux autres seront généralement imaginaires conjuguées et donneront un mouvement oscillatoire dont la fréquence faible vis-à-vis de celle du réseau sera la *fréquence propre* de la machine.

Toutefois, si les courants d'amortissement sont très puissants, ces deux racines peuvent devenir réelles et le mouvement lent cesse d'être oscillatoire.

Condition de stabilité. — Nous avons vu dans les cas particuliers étudiés, où l'équation caractéristique s'abaisse au 4^e degré, que la première condition à remplir pour qu'il y ait stabilité, est que le terme constant du développement de l'équation caractéristique (terme représentant le couple synchronisant de la théorie élémentaire), (1) soit de même signe que le terme du plus haut degré, ce qui nous a donné la condition :

$$C_s - N_0 \sin^2 \alpha > 0$$

c'est-à-dire

$$C_s \left(1 + \frac{r^2}{(S+A)(S+B)\omega^2} \right) - \frac{3}{2} r^2 \left(\frac{P_0^2}{(S+A)\omega^2} + \frac{Q_0^2}{(S+B)\omega^2} \right) > 0 \quad (17)$$

se réduisant quand $r = 0$, à :

$$C_s = 3 \left[\frac{EU \cos \psi}{(S+A)\omega^2} + \frac{U^2}{\omega^2} (\cos^2 \psi - \sin^2 \psi) \left(\frac{1}{S+B} - \frac{1}{S+A} \right) \right] > 0$$

et quand les réactions de la machine sont égales à :

$$\cos(\psi - \alpha) > 0.$$

Quand l'équation caractéristique est du 6^e degré, la même condition relative au terme constant subsiste : il est nécessaire pour que toutes

(1) Dans la théorie élémentaire des oscillations le couple synchronisant est défini par la considération de deux régimes permanents voisins. Si, quand on passe d'un régime à l'autre, ΔC_0 est la variation de couple, et $\Delta \psi$ la variation du déphasage, le rapport $\frac{\Delta C_0}{\Delta \psi}$ représente le couple synchronisant.

En partant de cette définition, on retrouve aisément la valeur (17) ci-dessus correspondant au terme constant de l'équation caractéristique complète.

les racines d'une équation du 6^e degré puissent être pseudo-négatives, que le terme constant soit de même signe que le terme en z^6 .

En développant le déterminant (5) (2^e partie) par rapport à la 2^e ligne par exemple, on se rend compte aisément que le terme constant de l'équation caractéristique complète, est indépendant des coefficients des courants d'amortissement : $\epsilon_1, \epsilon_2, \sigma_1, \sigma_2$, et a la même expression que dans l'équation incomplète (1) 3^e partie) c'est-à-dire :

$$C_s \left(1 + \frac{r^2}{(S+A)(S+B)\omega^2} \right) - \frac{3}{2} r^2 \left(\frac{P_0^2}{(S+A)\omega^2} + \frac{Q_0^2}{(S+B)\omega^2} \right)$$

Le coefficient du terme en z^6 est essentiellement positif. Donc, la condition (17) ci-dessus reste une *condition nécessaire de stabilité* dans le cas général.

On peut ajouter que dans la plupart des cas usuels, cette condition *sera suffisante* pour assurer réellement la stabilité.

En effet, ainsi que nous l'avons vu, en faisant abstraction de la résistance de l'induit, si la condition (17) est satisfaite, les courants d'amortissement assurent la convergence de l'oscillation lente. L'influence défavorable que la résistance de l'induit, généralement de faible valeur, peut exercer sur cette oscillation, reste pratiquement bien inférieure à l'action stabilisatrice des courants d'amortissement.

D'autre part, cette résistance assure la convergence de la vibration rapide.

Il y a donc stabilité de tous les termes de l'oscillation libre de la machine.

Toutefois, ce résultat peut être en défaut, s'il s'agit d'une machine n'ayant que de très faibles courants d'amortissement et une grande résistance sur l'induit. L'influence de la résistance peut être alors prépondérante et donner une oscillation lente divergente. Ce cas pourra se présenter, par exemple, avec un alternateur à pôles entièrement feuilletés, sans circuit amortisseur, avec circuit d'excitation de grande impédance et dont l'induit serait relié au réseau par une longue ligne résistante.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

APPAREILLAGE GÉNÉRAL. — TRACTION

L'appareillage électrique. — *Nouvelle Encyclopédie Electro-Mécanique*, par LAGRON. Un vol. broché 11,5×17,5 cm, de 579 p. et 334 figures. Prix : 70 fr. Librairie Scientifique Albert Blanchard, 3 bis, place de la Sorbonne. Paris. Editeur.

L'ouvrage débute par des généralités sur les règles de normalisation et par une étude élémentaire sur l'amorçage des arcs, les distances de coupure et les forces répulsives produites par les courants.

Après un chapitre consacré à l'étude des matériaux conducteurs et isolants utilisés dans l'appareillage électrique, dans lequel il est donné quelques indications sur les essais de rigidité diélectrique des porcelaines et des huiles, l'auteur traite du petit appareillage, décrit le matériel utilisé dans les installations d'éclairage et rappelle les schémas connus d'allumages multiples.

Passant ensuite au gros appareillage basse tension, il traite des interrupteurs et de leur dimensionnement, indique les valeurs numériques adoptées par le Syndicat des Constructeurs et donne quelques renseignements sur le calcul des fusibles. Dans les chapitres suivants sont étudiés : les disjoncteurs à basse tension (avec rappel du calcul d'un électro-aimant), les rhéostats et appareils de démarrage et de réglage à commande manuelle ou automatique. Le calcul graphique des rhéostats et le calcul des résistances métalliques ou liquides y est indiqué par l'auteur.

La partie consacrée à l'appareillage à haute tension traite tout d'abord des interrupteurs dans l'air et des sectionneurs ; elle contient un exposé élémentaire sur les surtensions et les appareils de protection correspondants.

Un chapitre relativement important est consacré à l'étude des interrupteurs et des disjoncteurs dans l'huile et de leurs relais et systèmes de commande. Il y est donné des indications sur la capacité de rupture des disjoncteurs.

Le dernier chapitre traite des tableaux et des postes de transformation ruraux.

Cet ouvrage d'un caractère relativement élémentaire rendra des services aux Ingénieurs débutants et aux agents techniques désirant se mettre au courant de l'appareillage moderne.

RECHERCHES

L'architecture de l'Univers, par M. P. COUDERC, Professeur agrégé de l'Université. Un vol. in-8 de 176 pages avec 8 planches hors texte, 20 fr. Librairie Gauthier-Villars.

Cet ouvrage rend compte de la gigantesque extension du domaine astronomique pendant ces dernières années. L'auteur expose les méthodes nouvelles et puissantes de l'Astrophysique, et discute quelques-unes des énigmes que propose l'étude des astres. On y trouve des chapitres sur la vie des étoiles, sur l'âge du monde, sur l'origine de l'énergie qui l'anime et qui paraît en quantité infinie, etc... La plupart des hypothèses examinées au cours de ces chapitres restent sans démonstration car, ainsi que l'expose l'auteur, tout pas en avant fait dans le domaine de l'Astronomie soulève deux ou trois mystères. La lecture de cet ouvrage complété par huit photographies de nuées stellaires, est des plus attrayantes.

La Planète Mars 1650-1920, par E.-M. ANTONIADI, astronome attaché à l'Observatoire de Meudon. Un volume broché 28×23 cm de 240 pages, avec dix planches hors texte, 80 fr., Paris 1930, Hermann et Cie, éditeurs. Hommage de l'auteur.

Dans ce mémoire, l'auteur expose les observations qu'il a faites sur Mars depuis le commencement du siècle avec la grande lunette de l'observatoire de Meudon.

Il analyse en outre tous les travaux exécutés sur ce monde voisin depuis Huyghens et donne l'historique complet de chaque point de la surface de l'astre depuis 270 ans.

Il démontre que les fameux canaux de mars ne sont qu'une illusion d'optique. Il prouve la présence d'une atmosphère à la surface de la planète et conclut que l'existence d'animaux et même de Martiens n'a rien d'improbable.

L'ouvrage se termine par la topographie complète de la planète.

Handbüch der Experimentalphysik. — Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H. — Tome XII, 2^e partie. *Electrodes incandescentes et tubes électroniques*, W. Schottky, H. Rothe, H. Simon. — Un vol. de 492 pages, 1928.

I. — PHYSIQUE DES ÉLECTRODES INCANDESCENTES. V. Schottky et H. Rothe. 276 pages, 55 figures.

L'auteur commence par envisager le problème du point de vue thermodynamique, et recherche les conditions d'équilibre des systèmes électriques; puis il traite de la pression et de l'émission des électrons, avec quelques considérations sur le « gaz électron ». Ensuite il étudie l'ionisation des corps portés à haute température, les effets thermiques accompagnant les phénomènes thermioniques, l'influence des atomes étrangers présents sur la surface émettrice ou combinés chimiquement. Les trois derniers chapitres sont consacrés à l'étude des mouvements des électrons dans le vide, à celle de l'influence d'un champ extérieur sur l'émission, et à l'apparition d'oscillations dans l'émission électronique.

II. — CONSTITUTION DES ÉLECTRODES INCANDESCENTES. H. Simon, 66 p., 36 fig.

Dans un premier chapitre, l'auteur traite des différentes sortes d'électrodes: Après avoir étudié les lampes à deux ou trois électrodes, et dit quelques mots des lampes bigrilles, l'auteur étudie les amplificateurs à lampes en haute et basse fréquence, ainsi que des montages spéciaux: push-pull, neutrodyne. Ensuite sont étudiés les générateurs d'oscillations, soit ordinaires, soit commandés par quartz. Pour terminer, un chapitre est consacré à l'étude des tubes électroniques comme redresseurs, soit redresseurs proprement dits, à filament dans le vide ou dans les gaz, soit détecteurs: détection par la plaque ou par la grille.

III. — LES TUBES ÉLECTRONIQUES ET LEUR UTILISATION. H. Rothe. 149 p., 88 fig.

métal pur, métal avec couche métallique à grande émission, électrode à oxydes rapportés, et étudie l'influence des gaz occlus. Dans un deuxième chapitre sont étudiées les conditions que doivent remplir les corps constituant les anodes, puis les cathodes équipotentiellées, et plus particulièrement les cathodes à chauffage indirect. Un troisième chapitre résume les moyens de produire et de mesurer les vides élevés, la mesure des hautes températures, et étudie la distribution des températures le long d'un filament.

J. BARRÉ.

Handbüch der Experimentalphysik. — Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H. — Leipzig. — Tome XIII. — 2^e partie 1929. — 1 volume de viii-314 pages, 76 figures.

I. — LA CONDUCTION DES IONS DANS LES GAZ, par E. SCHWEIDLER 105 p., 21 fig.

Après avoir passé en revue les agents d'ionisation, et indiqué des méthodes de détermination expérimentale du degré d'ionisation, l'auteur étudie la destruction des ions, soit par recombinaison des ions normaux, soit par adsorption à des noyaux et recombinaison avec des ions lents, soit par adsorption et diffusion. Des résultats expérimentaux viennent contrôler les théories proposées.

Un chapitre est ensuite consacré à la théorie et à la mesure du nombre d'ions en régime stationnaire. Puis l'auteur traite de la mobilité des ions, méthodes de mesure et résultats, et définit le coefficient de diffusion. Ensuite il étudie le courant électrique dans les gaz ionisés, soit au repos, soit en mouvement, ainsi que la conductibilité unilatérale par ionisation superficielle.

Pour terminer, sont donnés des renseignements sur la charge, la masse, les dimensions et la nature des ions.

II. — LES PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DE LA FLAMME, par A. BECKER, 205 p., 55 f.

Après avoir étudié les flammes au point de vue chimique et physique, l'auteur traite de la conductibilité électrique, et donne les caractéristiques courant-tension pour différentes flammes et dans diverses conditions. Il étudie ensuite l'influence de la concentration et de la nature du sel volatilisé dans la flamme, la relation entre la conductibilité et le poids atomique, la température, la pression, la nature du gaz. Puis il étudie la vitesse de migration des ions et des électrons, ainsi que la diffusion des vapeurs métalliques dans les flammes. Il termine par un résumé des connaissances théoriques actuelles sur les flammes.

J. BARRÉ.

Handbüch der Experimentalphysik. — Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H., Leipzig. — Tome XV. *Radioactivité*, par K. W. F. KOHLRAUSCH, 1928. — Un vol. de x-885 pages, avec 285 figures.

L'auteur commence par rappeler des généralités sur l'atome radioactif, sur les différentes radiations qu'il émet, ainsi que sur les produits de la transformation. Il étudie ensuite les rayons α , β , γ dans leurs sources, leurs modes d'observation, leurs propriétés, soit dans le vide, soit dans un milieu matériel; en particulier les rayonnements secondaires des rayons β et α (rayons H). Après chaque exposé théorique sont donnés et discutés des résultats expérimentaux. Ensuite un chapitre est consacré au rayonnement émis par réaction lors de l'émission des rayons α et β . Puis, après quelques indications sur les effets physiques, chimiques et physiologiques des rayonnements, l'auteur expose une théorie des transformations radioactives, comportant notamment une théorie générale des transformations pour les séries non ramifiées, l'étude de l'équilibre radioactif, la constance de la vitesse d'évolution et les discontinuités de celle-ci. Il passe ensuite en revue les méthodes des mesures radioactives: mesures d'activité, mesures de rapidité d'évolution. Un chapitre est ensuite consacré à l'étude des corps radioactifs, uranium, radium, actinium, thorium et leurs familles, ainsi qu'à l'activité des autres éléments. Pour terminer, l'auteur étudie le noyau atomique; il montre le caractère statistique de la loi de désintégration radioactive; il traite ensuite de la dislocation du noyau, dont la possibilité fut montrée par Rutherford; enfin, il donne des lois empiriques pour les propriétés du noyau, et rassemble les théories émises sur sa structure.

Handbüch der Experimentalphysik, par WIEN et HARMS, — Société Académique d'Éditions, Leipzig, 1929. — Tome XXIII, 2^e partie. — Un vol. relié 25×15 de 809 pages, avec 252 figures.

PHOSPHORESCENCE ET FLUORESCENCE (2^e partie), 293 pages, 52 figures.

Ce volume continue l'étude de la phosphorescence: d'abord les phénomènes d'extinction de la phosphorescence (exposé des phénomènes, mesures et leurs résultats, étude énergétique), puis un exposé des phénomènes d'excitation et d'extinction du phosphore par les rayons cathodiques.

L'auteur étudie ensuite la fluorescence de raies dans les gaz; puis la fluorescence de bandes successivement dans le cas des gaz et vapeurs, des solides et liquides purs, et dans celui des solutions. Pour ces dernières, l'auteur examine en détail l'influence des diverses constantes physiques.

Dans un dernier chapitre, l'auteur traite de l'influence de la lumière froide sur les phénomènes chimiques et biologiques.

PHÉNOMÈNES PHOTOÉLECTRIQUES, 516 pages, 200 figures.

D'abord une étude générale de l'émission d'électrons par les corps illuminés. Puis le cas des surfaces métalliques dans le vide: influence de l'intensité et de la longueur d'ondes de la lumière d'excitation, de la nature de la surface, de la température, de l'état physique, etc... L'auteur donne ensuite les méthodes de mesure de la vitesse d'émission des électrons (avec leurs résultats).

Ensuite exposé des phénomènes photo-électriques dans les autres cas: métaux dans une atmosphère gazeuse, solides non métalliques et liquides, gaz.

L'ouvrage se termine par des considérations de photoélectricité pratique: longueurs d'onde et sources de lumière à employer pratiquement, cellules photoélectriques, applications diverses.

R. COSTE.

AVIATION

L'Astronautique, par Robert ESNAULT-PELETERIE. Un vol. broché de 16,5 × 25 cm, de 240 pages, 18 fig. et 9 hors texte. Imprimerie A. Lahure, 9, rue de Fleurus, Paris.

Dans ce livre l'auteur traite scientifiquement le problème du fonctionnement des fusées qui constituent le seul moyen que l'on puisse envisager actuellement pour s'éloigner de la terre à de grandes distances. Il traite également des problèmes qui se rattachent aux voyages interplanétaires, tels que l'influence sur les organismes vivants des différences d'accélération et de l'absence de pesanteur. L'auteur montre que le fonctionnement des fusées est soumis à des lois insoupçonnées de la plupart des chercheurs qui se sont attaqués au problème et il indique que la connaissance de ces lois est indispensable pour étudier les conditions d'établissement de ces engins, notamment en ce qui concerne leur poids, leur accélération, leur vitesse dans la traversée de l'atmosphère, etc... La plupart des considérations exposées dans cet ouvrage sont des plus originales et sa lecture en est des plus attrayantes.

CONGRÈS. — ACTES OFFICIELS. — ANNUAIRES

Comptabilité à résultats mensuels d'une Société de Distribution d'Énergie Électrique, par Marius DUBOULOZ, un vol. broché de 16 × 25, de VIII, 150 pages, 27 figures, relié : 45 fr. ; broché : 36 fr. Dunod, Editeur.

Après avoir rappelé les bases de la législation des Distributeurs d'Énergie électrique et les différents modes de tarification, l'auteur aborde l'exposition d'un plan comptable s'appliquant à une Société qui ne produit pas elle-même de l'énergie, mais qui assure son transport et sa distribution.

Le plan comptable proposé comprend dix chapitres subdivisés en utilisant la classification décimale (méthode de Mehri Dewey). L'auteur étudie le fonctionnement de certains comptes particuliers à ce genre d'entreprise et s'étend particulièrement sur les branches suivantes :

Distribution de l'énergie.

Location d'appareils de contrôle et de consommation d'énergie.

Installations particulières.

Travaux d'extension.

Pour chacune de ces branches il décrit très complètement les différentes opérations comptables et donne de nombreux exemples des dispositions à adopter pour l'établissement des documents (journaux, états...) nécessaires à l'enregistrement de ces opérations.

Il aborde ensuite la question des journaux analytiques communs (journal des entrées en magasin, journal des sorties de magasin, journal de caisse) et du journal synthétique ou centralisateur, et il termine en schématisant les conditions d'établissement du bilan mensuel.

Ce livre qui applique au cas particulier des Sociétés de distribution d'énergie les méthodes les plus modernes de la Comptabilité, servira utilement de guide aux Services intéressés de ces Sociétés qui y trouveront un grand nombre de dispositions ingénieuses toujours clairement exposées.

IL Y A TRENTE ANS

Réunion ordinaire mensuelle du 10 décembre 1900

Présidence de M. E. MASCART, Président

M. ARMAGNAT fait une communication sur les *phasemètres industriels*. Le conférencier décrit les phasemètres ayant figuré à l'Exposition Universelle : celui de Teichmüller construit par Siemens et Halske, les phasemètres du professeur Riccardo Arno, celui d'Hartmann et Braun, et le phasemètre de l'Allgemeine. Il fait remarquer que si les résultats de ces appareils sont suffisants au point de vue industriel, il y a toujours lieu de craindre qu'une modification imprévue de la forme du courant n'amène une erreur sensible.

M. A. GUÉNÉE fait l'exposé de ses très intéressantes expériences sur les *applications industrielles des électro-aimants*.

Après avoir établi une théorie générale nouvelle de l'électro-aimant, le conférencier décrit différents types d'électros : à dispositifs coniques assurant une saturation constante, à armatures présentant une perméabilité variable, à circuits magnétiques dérivés de longueurs et de sections réglables, à ampère-tours variables.

Il expose les applications de ces électros aux manœuvres des aiguilles, des sémaphores, des pédales des chemins de fer, aux embrayages des machines, aux poinçonneuses, etc., puis les applications particulièrement intéressantes aux appareils à mouvements alternatifs rapides, aux perforatrices notamment.

TABLE MÉTHODIQUE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LE TOME X (4^e SÉRIE)

CLASSIFICATION

- | | |
|--|---|
| <p>A. — Production et utilisation mécanique de l'électricité.</p> <p>B. — Eclairage et chauffage. Radiations diverses.</p> <p>C. — Chimie, électrochimie, électro-metallurgie, piles, accumulateurs.</p> <p>D. — Appareillage général, canalisations, traction.</p> <p>E. — Télégraphie, téléphonie, transmission par ondes.</p> <p>F. — Recherches physiques, physiologie. — Appareils et méthodes de mesure.</p> | <p>G. — Aviation.</p> <p>H. — Législation.</p> <p>I. — Mathématiques, Mécanique rationnelle et mécanique appliquée.</p> <p>J. — Congrès, expositions, actes officiels, annuaires, études économiques, inventaires, statistiques, commémorations.</p> <p>K. — Formulaires, aide-mémoires, manuels. Dictionnaires.</p> <p>L. — Enseignement et divers.</p> <p>M. — Communications et informations diverses.</p> |
|--|---|

N. B. — *Le numéro en italique dans les ouvrages offerts et la bibliographie se réfère au compte rendu de l'ouvrage.*

A. — PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ

1^o COMMUNICATIONS FAITES À LA SOCIÉTÉ ET TRAVAUX DES SECTIONS

	PAGES
Artifice de l'accrochage et de la cage folle, par MM. Pestarini et Le Monnier. (Lettre de M. Boucherot, Remarque de M. Darrieus)	384
Auto-amorçage d'un moteur asynchrone fermé sur une capacité (L'), par M. Liénard	406
Centrales thermiques américaines. (Discussion du rapport de MM. Mathivet, Rauber, Génissieu, Neu, Boucherot, Darrieus)	247
Chauffage par machine frigorifique. (Communication présentée par M. Darrieus sur un travail de M. Halban, Membre de l'I. E. E.)	415
Chute de tension au contact des balais sur les bagues collectrices (La), par M. Perrier	903
Contribution à l'étude des oscillations d'un alternateur ou moteur synchrone, par M. Margand	1302
Détermination de données caractéristiques des transformateurs, par M. Bunet. Embrayages automatiques appliqués au démarrage des moteurs à cage d'écureuil. Discussion du rapport de M. Bethenod (MM. Le Monnier, Neu, de Pistoye, Leboucher, Graetzmueller, Boucherot)	704
Emploi des machines frigorifiques et des gaz à haute pression dans les centrales électriques et dans les postes de transformateurs. — Discussion du rapport de M. Neu (MM. Berger, Bunet, Neu)	232
Équilibrage hydraulique des stations centrales thermiques (Rapport sur l'), par M. J. Mathivet	241
Interconnexion des stations centrales des usines métallurgiques du bassin de Briey par le réseau de la Société électrique de la Sidérurgie lorraine (Note sur l'), par M. Sékutowicz	940
	880

	PAGES
Le moteur Dassenoy, par M. de Pistoye. Remarques de MM. Rieunier et Guillon	98
Méthode symbolique pour l'étude des phénomènes transitoires dans les machines polyphasées (Une), par M. Darrieus. (Discussion de M. Liénard)....	400
Modèles mécaniques en électrotechnique; applications aux problèmes de stabilité (Les). — Discussion du rapport de M. Darrieus (MM. Fallou et Lartigue)	230
Nouveau type de moteur asynchrone compensé (Sur le). — Discussion du rapport de M. de Pistoye (MM. Darrieus, Le Monnier, Bunet, de Pistoye).	263
Pertes supplémentaires dans les moteurs asynchrones de petite puissance (Les), par M. Le Monnier	1163
Stations centrales et sous-stations automatiques, par M. d'Audeville	732
Usines hydro-électriques et lignes à 220 000 V aux Etats-Unis, par M. Ch. Duval.	29
Utilisation rationnelle du vent. — Discussion du rapport de M. Neu (M. Darrieus)	244

2^o OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Les courants alternatifs industriels et leurs applications, par Richard Berger	108, 109
Das Bursten problem im Elektro Maschinenbau, par Heinrich W.	222
Exécution des enroulements des machines triphasées, par Maurice Le Cadre. 333, 1026	
Nouvelles installations de la Centrale d'Issy-les-Moulineaux, par MM. Ch. Malégarie, G. Dessus, J. Ducourneau, E. Gage, E. Gateau, R. Nampon, R. Torresi	109
La Vapeur	461

B. — ECLAIRAGE ET CHAUFFAGE. — RADIATIONS DIVERSES

1^o COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ ET TRAVAUX DES SECTIONS

Application des lois de l'incandescence au calcul des filaments de lampes électriques, par M. Tranchecoste	1002
Construction d'enseignes autolumineuses à face verre spécial dit « Prisma » éclairées par transparence au moyen de lampes à incandescence (Note sur la), par M. J. Fonsèque	1228
Croissance des végétaux en lumière artificielle (La). — Discussion du rapport de M. Truffaut (MM. Henry, Leblanc, Darmois, Truffaut)	274
Eclairage des studios, par M. G. Cabet	1231
Eclairage par les tubes luminescents (L'). — Discussion du rapport de M. Darmois (MM. Lepape, Leblanc, Laporte)	266
Etat actuel du problème de l'éclairage antiéblouissant des voitures automobiles. — Discussion du rapport de MM. Dourgnon et Waguet (M. Roux).	277
Lampes à gaz rares à basse tension par tache cathodique, par M. Abadie	675
Lampes à incandescence, par M. H. Grandjean	1225
Législation de l'éclairage, par M. H. Partridge	1221
Luminaires et éclairages intérieurs, par M. J. Dourgnon	1229
Progrès de l'optique physiologique (Les), par M. le Docteur Emile Haas.....	1236
Projecteurs et Phares	1221
Revue des principaux travaux exécutés sur la photométrie en 1929-1930, par M. Jouaust	1216
Situation de l'éclairage public par l'électricité en France et développement pendant 1928, par M. Lesouple	120

2^o OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Eclairage (huiles, alcool, gaz, électricité, photométrie), par L. Galine et B. Saint-Paul	334
Introduction à l'étude de l'optique appliquée, par Ch. Fabry	580

	PAGES
Introduction générale à la Photométrie, par Ch. Fabry	580, 804
Leçons de Photométrie, année 1928, par Ch. Fabry	580
Photographie des couleurs, par J. Thœvert	1261
Principes et applications de l'Eclairage, par R. de Valbreuze	334

3° IL Y A TRENTÉ ANS

Applications industrielles des électro-aimants, par Guenee	1344
Lampes à arc à bas voltage, par M. Bochet	224
Nouvelle lampe à arc à courant alternatif, par M. de Lénart	700

C. — CHIMIE. — ELECTROCHIMIE. — ELECTROMETALLURGIE
PILES. — ACCUMULATEURS

1° COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ ET TRAVAUX DES SECTIONS

Accumulateur au plomb. — Discussion du rapport de M. Rollet (MM. Vuignier, Féry, Jumau)	279
Considérations sur les industries électrochimiques et électrométallurgiques françaises, par M. Bunet	9
Documentation sur le chromage, par M. Altmayer	1117
Electrolytes forts (Les), par M. R. Dufour	1080
Extraction électrolytique de l'étain et du cuivre, des déchets de bronze, par O. Scarpa	572
Mesure de courants continus à intensités élevées, par M. Vassillière-Arlhac....	692
Méthodes modernes de nickelage, par M. Ballay	545
Présentation avec commentaires de films sur la soudure électrique, par M. Briey.....	292
Progrès récents de l'emploi du four électrique en aciérie (Les), par M. Levasseur	850
Réalisation industrielle de l'accumulateur Plomb-zinc, l'accumulateur léger Pouchain (Une), par M. Antoine. — Discussions (MM. Féry, Krieger, Antoine, Tarrin)	427
Recuits partiels par induction (Les), par M. Viry	416
Réglage des fours électriques par variation de tension, par P. Bergeon	1057
Redresseur Rectox (Le). — Discussion du rapport de M. Leblanc (M. Darmois).	291
Redresseurs à anode colloïdale. Présentation du rapport de M. André et Discussions	291

2° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Technische Elektrochemie, par Dr. Kurt Arndt	108, 464
--	----------

3° IL Y A TRENTÉ ANS

La stérilisation des eaux potables par l'ozone, par Abraham	1262
---	------

D. — APPAREILLAGE GENERAL. — CANALISATION
TRACTION

1° COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ ET TRAVAUX DES SECTIONS

Ampèremètre de barres et court-circuitmètre, par M. Villiers	689
Applications de la traction par accumulateurs aux poids lourds (Les), par M. Gasquet	798
Autoéquiréaction, par M. Benoit	1096
Câbles souterrains à haute tension (Les), par M. Delon,	200
Courts-circuits dans les Réseaux et problèmes connexes, par M. Langlois-Berthelot	1130
Emploi des condensateurs dans les réseaux de distribution (L'). — Discussion du rapport de M. Bunet (MM. Boucherot, Darrieus, Fallou, Ailleret et Roth A.)	304

	PAGES
Emploi des relais d'impédance pour la protection des lignes aériennes contre les mises à la terre (Sur l'), par M. Fallou	82
Etat actuel du problème de l'interconnexion des Réseaux (L'), par M. Fallou. — Discussions (MM. Daguerre, Parodi, Benoit, Fallou)	945
Freinage électrique en courant continu des trains sur pentes. — Discussion du rapport de M. Gratzmuller (MM. Gratzmuller, Bachellery, Lartigue)..	313
Limitation des courts-circuits dans les réseaux haute tension. — Discussion du rapport de M. Fallou (MM. Darrieus, Langlois-Berthelot, Fallou)	296
Quelques particularités des redresseurs modernes, par M. Roy	765
Protection des installations à basse tension contre la Foudre (La), par M. Ch. Ledoux	1061
Protection des installations par éclateurs courtcircuiteurs à disques très rapprochés (La), par M. Viry	443
Recherches sur les surtensions des orages dans les grands réseaux de distribution, par M. le Dr Harald Norinder	591
Stations centrales et sous-stations automatés, par M. d'Audeville	732
Tendances actuelles dans la construction et l'utilisation des interrupteurs à haute tension, par A. Roth	1030
Traction à accumulateurs dans les Mines (La), par M. J. Mille.....	1265
Travaux de la 2 ^e Commission mixte internationale chargée de la protection des canalisations souterraines contre les corrosions, par M. Bytynski.....	99
Transformateurs de réglage (Les), par M. Duverne	1257

2^o OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Appareillage électrique, par Lagron	1261
Appareillage électrique haute tension, par Ch. Bresson	333, 923
Électrification partielle du réseau de la Compagnie d'Orléans, par H. Parodi	108, 334
Protection of electrical circuits and equipment against lightning.....	460, 1026

3^o IL Y A TRENTÉ ANS

Appareillage électrique pour 3 000 V, par M. Vedovelli	224
Appareillage pour circuits de haute tension, par M. Zettler	336
Distribution de la Force à de grandes distances par l'électricité, au moyen du courant continu à intensité constante, par M. Cuénod	700
Tramway électrique du Bois de Boulogne à traction mixte par trolley et contacts superficiels système Vedovelli	336

E. — TELEGRAPHIE. — TELEPHONIE. — TRANSMISSIONS
PAR ONDES1^o COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ ET TRAVAUX DES SECTIONS

Alliages à haute perméabilité (Les). — Discussion du rapport de M. Chauchat (MM. Loubry, Demontvignier)	321
Cinquantenaire du téléphone à Paris (Le), par M. Reynaud-Bonin	101
Courroies transporteuses à sélection multiple et leurs applications dans les centraux téléphoniques et télégraphiques (Les), par M. Krieger	454
Développement des câbles à grande distance en France, par M. Prache.....	1173
Emploi du matériel automatique dans les réseaux téléphoniques ruraux (Vue d'ensemble sur l'), par M. Di Pace	1105
Evolution des procédés de fourniture de courant dans les centraux téléphoniques. — Discussion du rapport de M. Salomon (M. Reynaud-Bonin).....	321
Guidage des navires et des avions (Le), par M. Bourgonnier	660
Nouveaux dispositifs de chronométrage électrique, au central interurbain de Paris (Les), par M. Nimier	883
Présentation du Pick-up de la Société Steller, par M. Toulon. — Discussion (MM. Reynaud-Bonin, Clavier, Maguana, Toulon)	105

	PAGES
Protection du synchronisme sur les transmissions Baudot-Verdan. — Discussion du rapport de M. Bonnin (M. Reynaud-Bonin)	331
Récentes études sur les relais électromagnétiques employés en téléphonie, par M. Van Mierlo	973
Tendances actuelles dans l'étude des radio-récepteurs commerciaux, par M. E.-M. Deloraine	965
Traducteur Baudot non rotatif système Eglin-Cartier, par M. Ch. Bonnin.....	1249
Transmission simultanée de deux communications téléphoniques secrètes. — Discussion du rapport de M. Fayard (MM. Clavier, Cahen, Reynaud-Bonin. Fayard)	328

2° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

A la conquête des ondes. La T. S. F., par Paul Brenot	108, 461
Installations téléphoniques, par Parésy	580, 923
Le système de télégraphie Baudot et ses applications, par P. Mercy	333, 697
Telegraphy and telephony, par E. Mallett	108, 335
La Télégraphie sans fil, la Téléphonie sans fil, par Petit et Bouthillon. 323.	697

F. — RECHERCHES PHYSIQUES. — PHYSIOLOGIE. — APPAREILS
ET METHODES DE MESURE

1° COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ ET TRAVAUX DES SECTIONS

Ampèremètre de barres et court-circuitmètres, par M. Villiers	689
Appareil « Mader-Ott » pour l'analyse des courbes périodiques, par M. Heyberger	918
Appareils de mesure dans l'industrie radiologique, par M. Pilon	1189
Définition des capacités (La). — Présentation du rapport et d'une note au sujet du rapport de M. Ilivici (M. Della Riccia)	365
Développement de l'Electricité et l'évolution des conceptions scientifiques, par M. Parodi	470
Dispositifs de condensateurs et inductances analogues à celles de Boucherot (Les). — Discussion du rapport de M. Bunet (MM. Boucherot, Darrieus)..	369
Emploi des mathématiques en Electricité industrielle et scientifique (Quelques réflexions sur l'), par M. Parodi	491
Établissement de relations et de formules par la considération de dimensions et d'homogénéité, par M. Bunet	927
Formule simple permettant dans tous les cas le calcul rapide des résistances ohmiques en courant alternatif, par M. Levasseur	73
La Foudre globulaire, par E. Mathias	1280
Nouveau dispositif de mesures en courant alternatif musical. Le Potentiomètre-phasemètre, applications à la phonométrie, par Nandillon	777
Nouveaux oscillographes Blondel et leurs applications, par M. Vassillière-Arlhae	1152
Oscillations sinusoïdales et de relaxation, par M. Balph Van der Pol	813
Oscillographe cathodique transportable à développement synchronisé, par MM. Demontvigner et Touly	506
Projet des clauses techniques d'un cahier des charges pour la fourniture des condensateurs destinés à l'amélioration du facteur de puissance (Le). — Discussion du rapport de M. de la Gorce (MM. Lebaupin, Caye, Chevalier).	374
Puissance réactive (La). — Discussion des observations présentées par M. Boucherot (MM. Boucherot, Brylinski, Liénard, Juppont)	342
Tendances actuelles dans la construction et l'utilisation des transformateurs de mesure, par M. Ilivici	1191
Universalité nécessaire du système métrique (L'). — Discussion du rapport de M. Bayle (MM. Darrieus et Bayle)	377
Vues modernes sur l'électrostatique (Les). — Discussion du rapport de M. Chaumat (MM. Boucherot, Chaumat, Darrieus)	367

2° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

	PAGES
Ancienne et nouvelle théorie des Quanta, par Eug. Bloch	460
Architecture de l'Univers, par P. Coudere	1261
Comptage de l'Energie électrique en courants alternatifs, par J. Tartainville	333, 924
Conférence d'actualités scientifiques et industrielles, par MM. L. de Broglie, G. Foex, E. Bloch, L. Dunoyer, G. Rigaud, Lieut.-Colonel Jullien, L. Bloch-Kammerer, R. Mesny	580, 804
Contrôle et mesure de l'efficacité des traitements par le chlore, par Holverdo K.	460
Décharge électrique dans le vide et dans les gaz (La), par M. Leblanc et M. Leblanc fils	460, 806
Empfindliche galvanometer, par Otto Werner	581
Equilibre de la Constitution de la matière, par Klinkenberg	460
Etapas de la physique, par Volkringer II.	580
Etudes analytiques au sujet des combinaisons de quelques graisses imparfaitement connues, par Van Loon	460
Formation des acétates cycliques de la glycérine au moyen de l'acétal, par D. J. Van Roo	460
Gravitation, Lumière et Electromagnétisme, par E. Sevin	803, 1027
Introduction à l'étude de la Mécanique ondulatoire, par L. de Broglie..	580, 805
Introduction à l'étude de l'Optique appliquée, par Ch. Fabry	923
La Planète Mars 1859-1929, par E. M. Antoniadi	1261
Leçons de Photométrie professées à l'Institut d'Optique, par Ch. Fabry.....	805
Mécanique des quanta, par George Birtwistle	463
Méthodes nouvelles en analyse quantique (Mécanique quantique, Mécanique ondulatoire), par Julien Pacotte	333, 699
Molecular spectra and molecular structure	333, 699
Newton. Maupertuis et Einstein. par F. Prunier	462
Œuvres scientifiques de Jules Janssen, par Henri Déhéraïn (année 1929). 103,	581
Operational Methods in mathematical physics, par Harold Jeffreys	803
Œuvres scientifiques de J. Janssen, par H. Déhéraïn (année 1930).....	1261
Principes scientifiques de l'Electrotechnique, par Benischke.....	460, 1026
Recueils d'exposés sur les ondes et corpuscules, par L. de Broglie	580
Réflexions sur la mécanique ondulatoire, par E. de Camas	333, 698
Structure de la lumière, par Sir J. J. Thomson	333, 697
Structure de l'atome, tourbillon d'éther et Pensées scientifiques indépendantes, par L. Cuguin	462
Système métrique des poids et mesures, par G. Bigourdan	803, 1027
Temps absolu et l'espace à quatre dimensions (Le), par E. Sevin	805
The propionic acid Bacteria, par C. B. Van Niel	460
Traité de physique générale et expérimentale Mécanique-Chaleur, année 1930, de Jules Lemoine et Auguste Blanc	460

3° IL Y A TRENTE ANS

Appareils électriques de mesure figurant à l'Exposition Universelle de 1900, par M. Allamet	812
Ions dans les gaz (Les), par M. Langevin	588
Phasemètres industriels, par Armagnat	1341
Quelques idées nouvelles sur le mécanisme de l'électrolyse par les courants de retour des transmissions, par G. Claude	700
Ravens cathodiques et les rayons de Röntgen, par P. Villard	464

G. — AVIATION

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Aérodynamique des ailes sustentatrices et des hélices (L'), par Maurice Roy. 803	811
Astronautique, par R. Esnault-Pelterie	1261, 1343

H. — LEGISLATION**OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE**

	PAGES
Atteintes à la propriété à raison des Travaux publics (Des), par Ch. Blaevoet. 693	4028
Cahier des Charges pour les distributions d'énergie, par Paul Bougault. 222	809
Code des distributions d'électricité, par Etienne Carpentier..... 222	586
Jurisprudence de la Houille Blanche, par Achille Mestre..... 222	585
Législation des chutes d'eau. Sources. Rivières. Cours d'eau non navigables, par Paul Bougault 222	808
Législation nouvelle des chutes d'eau, par Paul Bougault..... 222	809
Nouveau régime légal des distributions d'énergie électrique, par Pierre Jolly 222	586
Propriétaires et Compagnies de distribution d'énergie électrique, par Achille Mestre 222	586
Standards. Le travail américain vu par un ouvrier français, par H. Dubreuil..	586
Syndicats financiers, par J. Tchernoff 696	808

**I. — MATHÉMATIQUES. — MÉCANIQUE RATIONNELLE
MÉCANIQUE APPLIQUÉE****OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE**

Essais, réglage et mise au point des moteurs d'automobiles et d'aviation. par René Bardin	1027
Leçons sur les systèmes d'équations aux dérivées partielles, par Maurice Janet	223, 804.

**J. — CONGRES. — EXPOSITIONS. — ACTES OFFICIELS. — ANNUAIRES
ETUDES ECONOMIQUES
INVENTAIRES. — STATISTIQUES. — COMMEMORATIONS****OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE**

Abstracts of papers to be read at World Engineering Congress Tokio	696
Annuaire de 1930 de l'Académie des Sciences	333
Annuaire électrotechnique tchécoslovaque 1929	111
Annuaire général de l'Université et de l'enseignement français.....	803
Annuaire 1929 de la Société Amicale de Secours des Anciens Elèves de l'Ecole Polytechnique	222
Annuaire de l'Union des Syndicats de l'Electricité année 1929	108
Classification décimale universelle de l'Institut international de Bibliographie. Palais mondial de Bruxelles	1261
Comptabilité à résultats mensuels d'une Société à distribution d'énergie électrique, par M. Dubouloz	1261
Conférence internationale des Grands Réseaux Electriques à Haute tension. par Jean Tribot-Laspière	803, 810
Congrès de Tokio 1929 (trois volumes)	1261
50 Jahre Elektrotechnischer Verein 1879-1929	460
La France économique en 1928, par Jacques-Henri Adam	110
Mechanical Engineering (50 ^e anniversaire)	1261

**K. — FORMULAIRES. — AIDE-MEMOIRES. — MANUELS
DICTIONNAIRES****OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE**

Agenda Béranger 1930 à l'usage des ingénieurs	108, 584
Agenda Dunod 1930. « Electricité », par L.-D. Fourcault.....	595
Agenda Dunod 1930, par J. Izart	584

	PAGES
Agenda d'électricité pour 1930, par MM. P. Bunet et A. Ceytre	583
Agenda industriel J.-B. Baillière, année 1930. « Electricité »	223
Aide-Mémoire de l'Ingénieur	223
Apprentissage de la T. S. F., par André Clavier	222. 584
Electricité, par Fourcault L. D.	223
Electricité à la maison, par E. Marce	110
Guide de l'Ingénieur Techno-Comptable, par Léon Melot	583
Handbuch der Experimentalphysik de l'Äkademische Verlagsgesellschaft M.B.H. de Leipzig	460 1341-1342
Monteur Electricien (Manuel pratique du), par Laffargue et L. Jumau.....	1261
Physique industrielle, par Izart	222

L. — ENSEIGNEMENT ET DIVERS

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Corso teorico-pratico di Elettrotecnica, par Luigi Lombardi	582
Cours d'électricité, par M. Veaux	108. 582
Cours d'électricité à l'usage de l'enseignement supérieur scientifique et technique, par G. Bruhat	696. 808
Den Polytekniske Laereantsalt, par Lumdby J.-T.	460
Deux heures de Physique, par Biquard et Joliot	803
Etablissement des prix de revient, par le Lieutenant-Colonel Rimailho	333
Leçons élémentaires de Physique, par Albert Turpain	590 807
Leçons sur la résistance des fluides non visqueux, par Paul Painlevé... 696	806
Leçons sur l'Hydrodynamique, par Henri Villat	696 806
Leçons sur les conduites, par Ch. Camichel	696 807
Leçons sur les systèmes d'équation aux dérivées partielles, par M. Janet. 223	894
Physique Moderne, par Gaetano Castelfranchi	803 1028
Principii scientifici di elettrotecnica, par L. Lombardi	582
Traité de Physique générale et expérimentale, par J. Lemoine et A. Blanc	808
Œuvres de Maine de Biran, par P. Tisserand	1261

M. — COMMUNICATIONS ET INFORMATIONS DIVERSES

Allocution de M. Bunet, Président sortant	119
Allocution de M. Bunet, à la Séance d'ouverture de la Semaine d'octobre 1929.	227
Assemblée générale ordinaire du 4 janvier 1930	114
Assemblée générale ordinaire du 5 avril 1930	590
Attribution pour 1930, de la Médaille Mascart à M. Paul Janet	221. 657
Attribution des Prix Ance! et Cheux pour 1930	341
Cinquantenaire de l'Elektrotechnischer Verein	381
Congrès de Tokio en 1929	382. 880
Distinctions obtenues par les Membres de la Société Française des Electriciens.	593
Dons à la Société Française des Electriciens	7
Dons à l'Ecole supérieure d'Electricité	118. 468
Election de M. Paul Janet, comme Président d'Honneur de la S.F.E. 114. 221,	380
Errata à la Communication de M. Bunet	221
— à la Communication de M. Duval	221
— à la Communication Della Riccia	659
— à la Discussion du Rapport de M. Bayle	659
— à la Communication de M. Liénard	659
— à la Communication de M. Van der Pöl	1256
Membres décédés	703
Membres titulaires	6. 117, 338, 466, 591, 702. 814
Nécrologie: M. Lieb	7
— M. Bateau	339
— Le Général Sébert	340

	PAGES
Présentation de la nouvelle Salle de démonstration de la Compagnie des lampes.	656
Rapport du Comité d'Administration	618
Rapport de la Commission des Comptes	624
Rapport annuel sur le L. C. E. et l'E. S. E.	638
Rapport annuel du Groupe du Sud-Ouest	652
Remise de la médaille Kelvin à M. André Blondel	657
Renouvellement partiel du Bureau et du Comité	114
Réunions ordinaires mensuelles du	
Samedi 7 décembre 1929	6
Samedi 4 janvier 1930	117
Samedi 1 ^{er} février 1930	338
Samedi 1 ^{er} mars 1930	466
Samedi 5 avril 1930	591
Mercredi 7 mai 1930	702
Mercredi 4 juin 1930	814
Visite du Centre d'Etudes de la Société Industrielle des Procédés W.-A. Loth.	656

Table des noms d'auteurs

CITÉS DANS LE TOME X (4^e SÉRIE)

Communications faites à la Société, p. 1355.
Ouvrages offerts à la Société et Bibliographie, p. 1360.
Il y a trente ans, p. 1362.

COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

	PAGES
ABADIE. — Lampes à gaz rares à basse tension par tache cathodique.....	675
AILLERET. — Discussion du rapport de M. Bunet sur l'Emploi des condensa- teurs dans les réseaux de distribution	309
ALTMAYER. — Documentation sur le chromage	1117
ANTOINE — Une réalisation industrielle de l'accumulateur Plomb-zinc, l'ac- cumulateur léger Pouchain	427
AUDVILLE (D'). — Stations centrales et sous-stations automates	732
BACHELLERY. — Discussion du rapport de M. Gratzmuller sur le Freinage électrique en courant continu des trains sur pentes	316
BALLAY. — Les méthodes modernes de nickelage	545
BAYLE. — Discussion de son rapport sur l'Universalité nécessaire du système métrique	377
BENOIT. — Autoéquiréactance	1096
BERGEON. — Discussion du rapport de M. Mathivet sur les centrales ther- miques américaines	249
BERGEON. — Le réglage des fours électriques par variation de tension	1057
BERGER. — Discussion du rapport de M. Neu sur l'emploi des Machines frigo- rifiques et des gaz à haute pression dans les centrales électriques et dans les postes de transformateurs	241
BONNIN (Ch.). — Traducteur Baudot non rotatif système Eglin-Cartier.....	1249
BOUCHEROT. — Discussion du rapport de M. Bethenod sur les embrayages automatiques appliqués au démarrage des moteurs à cage d'écurie.....	240
BOUCHEROT. — Discussion du rapport de M. Mathivet sur les Centrales ther- miques américaines	260
BOUCHEROT. — Discussion du rapport de M. Bunet sur l'emploi des condensa- teurs dans les réseaux de distribution	304
BOUCHEROT. — Discussion de ses observations sur la puissance réactive	342
BOUCHEROT. — Discussion du rapport de M. Chaumat sur les vues modernes sur l'électrostatique	367
BOUCHEROT. — Discussion du rapport de M. Bunet sur les dispositifs de conden- sateurs et inductances analogues à celles de Boucherot	369
BOUCHEROT. — M. Girault donne lecture de la note de M. Pestarini sur l'arti- fice de l'accrocheur et de la cage folle	392
BOURCONNIER. — Le guidage des navires et des avions	660
BRILLIE. — Présentation, avec commentaires, de films sur la soudure élec- trique	292
BRYLINSKI. — Travaux de la 2 ^e section de la Commission Mixte Internationale chargée de la protection des canalisations souterraines contre la corrosion.	99
BRYLINSKI. — Discussion des Observations présentées par M. Boucherot sur la puissance réactive	345
BUNET. — Considérations sur les Industries électrochimiques et électrométal- lurgiques françaises	9
BUNET. — Discussion du rapport de M. Neu sur l'emploi des machines frigori- fiques et des gaz à haute pression dans les centrales électriques et dans les postes de transformateurs	241
BUNET. — Discussion du rapport de M. de Pistoye sur le nouveau type de moteur asynchrone compensé	263

	PAGES
BUNET. — Détermination de données caractéristiques des transformateurs	705
BUNET. — Etablissement de relations et de formules par la considération de dimensions et d'homogénéité	927
BUNET. — Discussion de la communication de M. Sékutowicz sur la note sur l'interconnexion des stations centrales des usines métallurgiques du Bassin de Briey par le réseau de la Société Electrique de la Sidérurgie Lorraine	901
CABET. — Eclairage des studios	1231
CAHEN. — Discussion du rapport de M. Fayard sur la transmission simultanée de deux communications téléphoniques secrètes	329
CAYE. — Discussion du rapport de M. de la Gorce sur le projet des clauses techniques d'un cahier des charges pour la fourniture des condensateurs destinés à l'amélioration du facteur de puissance	375
CHAUMAT. — Discussion de son rapport sur les vues modernes sur l'électrostatique	367
CHEVALIER. — Discussion du rapport de M. de la Gorce sur le projet des clauses techniques d'un cahier des charges pour la fourniture des condensateurs destinés à l'amélioration du facteur de puissance	376
CLAVIER. — Discussion du rapport de M. Fayard sur la transmission simultanée de deux communications téléphoniques secrètes	328
DARMOIS. — Discussion du rapport de M. Leblanc sur le redresseur Rectox.	291
DARMOIS. — Discussion du rapport de M. Truffaut sur la croissance des végétaux en lumière artificielle	276
DARMOIS. — Présente une communication au sujet d'un travail de M. Hal-dame (membre de l'I. E. E.) sur le chauffage par machine frigorifique.	415
DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. Neu sur l'utilisation rationnelle du vent	244
DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. Mathivet sur les Centrales thermiques américaines	262
DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. de Pistoye sur le nouveau type de moteur asynchrone compensé	263
DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. Fallou sur la limitation des courts-circuits dans les réseaux haute-tension	296
DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. Bunet sur l'emploi des condensateurs dans les réseaux de distribution	307
DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. Bunet sur les dispositifs de condensateurs et inductances analogues à celles de Boucherot	372
DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. Chaumat sur les vues modernes sur l'électrostatique	367
DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. Bayle sur l'Universalité nécessaire du système métrique	377
DARRIEUS. — Remarque au sujet de la note de M. Pestarini et de M. Le Monnier sur l'artifice de l'accrochage de la cage folle	394
DARRIEUS. — Méthode symbolique pour l'étude des phénomènes transitoires dans les machines polyphasées	400
DARRIEUS. — Discussion de la communication de M. Sékutowicz sur la note sur l'interconnexion des stations centrales des usines métallurgiques du Bassin de Briey par le réseau de la Société Electrique de la Sidérurgie Lorraine	901
DELLA RICCIA. — Présentation d'une note au sujet du rapport de M. Ilievici sur la définition des capacités	365
DELON. — Les câbles souterrains à haute tension	200
DELOIR. — Tendances actuelles dans l'étude des Radio-Récepteurs commerciaux	965
DEMONTVIGNIER. — Discussion du rapport de M. Chauchat sur les Alliages à haute perméabilité	326
DEMONTVIGNIER. — Oscillographe cathodique transportable à développement synchronisé	506
DI PACE. — Vue d'ensemble sur l'emploi du matériel automatique dans les réseaux téléphoniques ruraux	1105

	PAGES
DOURGNON. — Discussion de son rapport sur l'Etat actuel du problème de l'éclairage antiéblouissant des voitures automobiles	277
DOURGNON (J.). — Luminaires et éclairages intérieurs	1229
DUFOUR (R.). — Les Electrolytes forts	1080
DUVAL. — Usines hydro-électriques et lignes à 200 000 V aux Etats-Unis.....	29
DUVERNE. — Les transformateurs de réglage	1257
ERHMANN. — Discussion de la Communication de M. Sékutowicz sur la note sur l'interconnexion des stations centrales des usines métallurgiques du Bassin de Briey par le Réseau de la Société Electrique de la Sidérurgie Lorraine	902
FALLOU. — Sur l'emploi des relais d'impédance pour la protection des lignes aériennes contre les mises à la terre	82
FALLOU. — Discussion du rapport de M. Darrieus sur les modèles mécaniques en électrotechnique, applications aux problèmes de stabilité.....	230
FALLOU. — Discussion de son rapport sur la limitation des courts-circuits dans les réseaux haute tension	296
FALLOU. — Discussion du rapport de M. Bunet sur l'emploi des condensateurs dans les réseaux de distribution	308
FALLOU. — L'Etat actuel du problème de l'interconnexion des réseaux.....	945
FAYARD. — Discussion de son rapport sur la transmission simultanée de deux communications téléphoniques secrètes	328
FÉRY. — Communication par M. Bunet de sa lettre au sujet du rapport de M. Rollet sur l'accumulateur au plomb	282
FONSÈQUE (J.). — Note sur la construction d'enseignes auto-lumineuses à face verre spécial dit « Prisma » éclairées par transparence au moyen de lampes à incandescence	1228
GASQUET. — Les applications de la traction par accumulateurs aux poids lourds (observations de M. Gratzmuller)	798
GENISSIEU. — Discussion du rapport de M. Mathivet sur les Centrales thermiques américaines	256
GIRAULT. — Discussion de la communication de M. Perrier sur la chute de tension au contact des balais sur les bagues collectrices	917
GORGE (DE LA). — Discussion de son rapport sur les clauses techniques d'un cahier des charges pour la fourniture des condensateurs destinés à l'amélioration du facteur de puissance	374
GRANDEJEAN (H.). — Lampes à incandescence	1225
GRATZMULLER. — Discussion du rapport de M. Bethenod sur les embrayages automatiques appliqués au démarrage des moteurs à cage d'écureuil	239
GRATZMULLER. — Discussion de son rapport sur le freinage électrique en courant continu des trains sur pentes	313
GRATZMULLER. — Discussion de la communication de M. Perrier sur la chute de tension au contact des balais sur les bagues collectrices	916
GUILLON. — Remarques au sujet de la note de M. de Pistoye sur le moteur Dassenoy	98
HAAS (Dr Emile). — Les progrès de l'optique physiologique	1236
HENRY. — Discussion du rapport de M. Truffaut sur la croissance des végétaux en lumière artificielle	274
HEYBERGER. — Appareil « Mader-Ott » pour l'analyse des courbes périodiques.	918
ILIOVICI. — Tendances actuelles dans la construction et l'utilisation des transformateurs de mesure	1191
JOUAUST (R.). — Revue des principaux travaux exécutés sur la photométrie en 1929-1930	1216
JUMAU. — M. Blondin présente et résume sa note au sujet du rapport de M. Rollet sur l'accumulateur au plomb	284
JUPPONT. — Discussion des observations présentées par M. Boucherot sur la puissance réactive	362
KRIEGER. — Discussion de la communication de M. Antoine sur une réalisation industrielle de l'accumulateur Plomb-zinc: l'accumulateur léger Pouchain	447
KRIEGER. — Les courroies transporteuses à sélection multiple et leurs applications dans les centraux télégraphiques et téléphoniques	454

LANGLOIS-BERTHELOT. — Discussion du rapport de M. Fallou sur la limitation des courts-circuits dans les réseaux haute-tension	297
LANGLOIS-BERTHELOT. — Courts-circuits dans les Réseaux et problèmes connexes.	1130
LAPORTE. — Eclairage par les tubes luminescents	271
LARTIGUE. — Discussion du rapport de M. Darrius sur les modèles mécaniques en électrotechnique, applications aux problèmes de stabilité.....	230
LARTIGUE. — Discussion du rapport de M. Gratzmuller sur le freinage électrique en courant continu des trains sur pentes	318
LEBAUPIN. — Discussion du rapport de M. de la Gorce sur le projet des clauses techniques d'un cahier des charges pour la fourniture des condensateurs destinés à l'amélioration du facteur de puissance	374
LEBLANC. — Eclairage par les tubes luminescents	270
LEBLANC. — Discussion du rapport de M. Truffaut sur la Croissance des végétaux en lumière artificielle	275
LE BOUCHER. — Discussion du rapport de M. Bethenod sur les embrayages automatiques appliqués au démarrage des moteurs à cage d'écureuil	238
LEDoux (Ch.). — La protection des installations basse tension contre la foudre	1061
LE MONNIER. — Discussion du rapport de M. Bethenod sur les embrayages automatiques appliqués au démarrage des moteurs à cage d'écureuil.....	232
LE MONNIER. — Discussion du rapport de M. de Pistoye sur le nouveau type de moteur asynchrone compensé	263
LE MONNIER. — Les pertes supplémentaires dans les moteurs asynchrones de petite puissance	1163
LE MONNIER. — Artifice de l'accrocheur et de la cage folle	392
LEPAPE. — Eclairage par les tubes luminescents	266
LESOUPLE. — Situation de l'éclairage public par l'électricité en France et développement pendant 1928	120
LEVASSEUR. — Formule simple permettant, dans tous les cas, le calcul rapide des résistances chimiques en courant alternatif	73
LEVASSEUR. — Les progrès récents de l'emploi du four électrique en aciérie ..	850
LIÉNARD. — Discussion des observations présentées par M. Boucherot sur la puissance réactive	361
LIÉNARD. — L'auto-amorçage d'un moteur asynchrone fermé sur une capacité	406
LIÉNARD. — Discussion de la communication de M. Darrius sur une méthode symbolique pour l'étude des phénomènes transitoires dans les machines polyphasées	406
LOUBRY. — Discussion du rapport de M. Chauchat sur les alliages à haute perméabilité	321
MARGAND (F.). — Contribution à l'étude des oscillations d'un alternateur ou moteur synchrone	1302
MATHIAS (E.). — La foudre globulaire	1280
MATHIVET. — Discussion de son rapport sur les centrales thermiques américaines	247
MATHIVET. — Rapport sur l'équilibrage hydraulique des stations centrales thermiques	940
MILLE (J.). — La traction à accumulateurs dans les Mines	1265
NABILLON. — Un nouveau dispositif de mesure en courant alternatif musical. Le Potentiomètre-phasemètre, applications à la phonométrie	777
NEU. — Discussion de son rapport sur l'emploi des machines frigorifiques et des gaz à haute pression dans les centrales électriques et dans les postes de transformateurs	241
NEU. — Discussion du rapport de M. Bethenod sur les embrayages automatiques appliqués au démarrage des moteurs à cage d'écureuil	236
NEU. — Discussion du rapport de M. Mathivet sur les Centrales thermiques américaines	260
NIMIER. — Les nouveaux dispositifs de chronométrage électrique au central interurbain de Paris	883
NORINDER. — Recherches sur les surlensions des orages dans les grands réseaux de distributions	594

	PAGES
PARODI (H.). — Le développement de l'Electricité et l'évolution des conceptions scientifiques	470
PARODI (H.). — Quelques réflexions sur l'emploi des mathématiques en électricité industrielle et scientifique	491
PARTRIDGE (H.). — Législation de l'éclairage	1221
PERRIER. — La chute de tension au contact des balais sur les bagues collectrices (Discussion. — MM. Pestarini, Perrier, Gratzmuller, Girault)	903
PESTARINI. — Artifice de l'accrocheur et de la cage folle	384, 399
PESTARINI. — Discussion de la communication de M. Perrier sur la chute de tension au contact des balais sur les bagues collectrices	916
PETIT (G. E.). — Remarques sur les derniers multiplicateurs statiques de haute fréquence employés en T. S. F.	667
PILON. — Appareils de mesure dans l'industrie radiologique	1189
PISTOYE (de). — Le moteur Dassenoy	95
PISTOYE (de). — Discussion du rapport de M. Béthenod sur les embrayages automatiques appliqués au démarrage des moteurs à cage d'écureuil	237
PISTOYE (de). — Discussion de son rapport sur le nouveau type de moteur asynchrone compensé	263
PRACHE. — Développement des câbles à grande distance en France	1173
RAUBER. — Discussion du rapport de M. Mathivet sur les centrales thermiques américaines	251
REYNAUD-BONIN. — Cinquantenaire du téléphone à Paris	101
REYNAUD-BONIN. — Discussion du rapport de M. Salomon sur l'évolution des procédés de fourniture de courant dans les centraux téléphoniques	321
REYNAUD-BONIN. — Discussion du rapport de M. Fayard sur la transmission simultanée de deux communications téléphoniques secrètes	330
REYNAUD-BONIN. — Discussion du rapport de M. Bonnin sur la protection du synchronisme sur les transmissions Baudot-Verdan	331
RIEUNIER. — Remarques au sujet de la communication de M. de Pistoys sur le moteur Dassenoy	98
RIEUNIER. — Discussion de la communication de M. Sékutowicz sur la note sur l'interconnexion des stations centrales des usines métallurgiques du Bassin de Briey par le réseau de la Société Electrique de la Sidérurgie lorraine	901
ROTH (A.). — Discussion du rapport de M. Bunet sur l'emploi des condensateurs dans les réseaux de distribution	311
ROTH (A.). — Tendances actuelles dans la construction et l'utilisation des interrupteurs à haute tension	1030
ROUX. — Discussion du rapport de MM. Dougnon et Wagnet sur l'état actuel du problème de l'éclairage antiéblouissant des voitures automobiles.	277
ROY. — Quelques particularités des redresseurs modernes	765
SCARPA. — Extraction électrolytique de l'étain et du cuivre, des déchets de bronze	572
SEKUTOWICZ. — Note sur l'interconnexion des stations centrales des usines métallurgiques du Bassin de Briey par le réseau de la Société électrique de la Sidérurgie lorraine. (Discussion. — MM. Bunet, Sekutowicz, Rieunier, Darrieus, Ehrmann.)	889
SOSNOWSKI. — Discussion du rapport de M. Mathivet sur les centrales thermiques américaines	247
TARRIN. — Discussion de la communication de M. Antoine sur une réalisation industrielle de l'accumulateur plomb-zinc : l'accumulateur léger Pouchain	447
TOULON. — Présentation du Pick-up de la Société Steller	105
TOULY. — Oscillographe cathodique transportable, à développement synchronisé	506
TRANCHECOSTE. — Application des lois de l'incandescence au calcul des filaments de lampes électriques	1002
TRUFFAUT. — Discussion de son rapport sur la croissance des végétaux en lumière artificielle	274

	PAGE
VAN DER POL (Balth). — Oscillations sinusoïdales et de relaxation	818
VAN MIERLO. — Récentes études sur les relais électromagnétiques employés en téléphonie	973
VASSILLIÈRE-ARLHAC. — Mesure de courants continus à intensités élevées	692
VASSILLIÈRE-ARLHAC. — Nouveaux oscillographes Blondel et leurs applications	1152
VILLIERS. — Ampèremètre de barres et courtcircuitmètre	689
VIRY. — Les recuits partiels par induction	416
VIRY. — La protection des installations par éclateurs courtcircuiteurs à disques très rapprochés	448
VIIGNER. — Discussion du rapport de M. Rollet sur l'Accumulateur au plomb	280
WAGUET. — Discussion de son rapport sur l'état actuel du problème de l'éclairage antiéblouissant des voitures automobiles	277

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

Académie des Sciences (Annuaire de 1930 de l')	333
ADAM (Henri). — La France économique en 1928	110
Annuaire électrotechnique tchécoslovaque 1929	111
ANTONIADI. — La Planète Mars	1261, 1341
BABCOCK. — La Vapeur	461
BAILLIÈRE (J.-B.). — Agenda industriel J.-B. Baillière, année 1930, « Electricité »	223
BARDIN (René). — Essais, réglage et mise au point des moteurs d'automobiles et d'aviation	1027
BENISCHKE. — Principes scientifiques de l'Electrotechnique	460, 1028
BÉRANGER (Ch.). — Agenda Béranger 1930	108, 584
BERGER (Richard). — Les courants alternatifs industriels et leurs applications	108, 109
BIGOURDAN (G.). — Système métrique des poids et mesures	803, 1027
Biquard. — Deux heures de physique	803
BIRTWISTLE (George). — Mécanique des quanta	463
BLAEVOET (Ch.). — Des atteintes à la propriété à raison des Travaux publics	696, 1028
BLANC (A.). — Traité de Physique générale et expérimentale, mécanique, chaleur, année 1930	808
BLOCH (Eugène). — Ancienne et nouvelle théorie des Quanta	460
BLOCH (Eugène). — Conférences d'actualités scientifiques et industrielles	580, 804
BLOCH-KAMMERER (L.). — Conférences d'actualités scientifiques et industrielles	580, 804
BOUGAULT (P.). — Cahier des charges pour les distributions d'énergie	222, 809
BOUGAULT (P.). — La Législation des chutes d'eau. Sources. Rivières	222, 809
BOUGAULT (P.). — Législation nouvelle des chutes d'eau	222, 809
BOUTHILLON. — La télégraphie sans fil, la téléphonie sans fil	333, 697
BRENOT (P.). — La conquête des ondes. La T. S. F.	108, 461
BRESSON (Ch.). — Appareillage électrique haute tension	333, 923
BROGLIE (Louis DE). — Introduction à l'étude de la Mécanique ondulatoire	580, 805
BROGLIE (Louis DE). — Recueils d'exposés sur les ondes et corpuscules	580
BROGLIE (Louis DE). — Conférences d'actualités scientifiques et industrielles	580, 804
BRUHAT (G.). — Cours d'Electricité à l'usage de l'enseignement supérieur scientifique et technique	696, 808
BUNET (P.). — Agenda d'électricité pour 1930	583
CAMAS (E. DE). — Reflexions sur la mécanique ondulatoire	333, 698
CAMICHEL (Ch.). — Leçons sur les conduites	696, 807
CARPENTIER (E.). — Code des Distributions d'Electricité	222, 586
CASTELFRANCHI (G.). — Physique moderne	803, 1028
CEVRE (A.). — Agenda d'électricité pour 1930	583
CLAVIER (A.). — L'apprentissage de la T. S. F.	222, 584
COCARD (J.). — Aide-Mémoire de l'Ingénieur	223, 1201
COUDERC. — L'architecture de l'Univers	1261, 1340
CUGNIN (L.). — Structure de l'atome, tourbillon d'éther et Pensées scientifiques indépendantes	462

	PAGES
DEHERAIN (H.). — Œuvres scientifiques de J. Janssen (année 1929).....	108, 581
DEHERAIN (H.). — Œuvres scientifiques de J. Janssen (année 1930)	1261
DESSUS (G.). — Nouvelles installations de la Centrale d'Issy-les-Moulineaux..	109
DUBOULOZ. — Comptabilité à résultats mensuels d'une Société à distribution d'Énergie électrique	1261, xxx
DUBREUIL (II.). — Standards. — Le travail américain vu par un ouvrier français	586
DUCOURNEAU (J.). — Nouvelles installations de la Centrale d'Issy-les-Mouli- neaux	109
DUNOYER (L.). — Conférences d'actualités scientifiques et industrielles	580, 804
ESNAULT-PELTERIE (R.). — Astronautique	1261, 1343
FABRY (Charles). — Leçons de Photométrie, année 1928	580
FABRY (Charles). — Leçons de Photométrie professées à l'Institut d'Optique..	805
FABRY (Charles). — Introduction à l'étude de l'Optique appliquée	580, 923
FABRY (Charles). — Introduction générale à la Photométrie	580, 804
FOEX (G.). — Conférences d'actualités scientifiques et industrielles	580, 804
FOURCAULT (L.-D.). — Electricité	223
FOURCAULT (L.-D.). — Agenda Dunod 1930. « Electricité »	585
GAGE (E.). — Nouvelles installations de la Centrale d'Issy-les-Moulineaux....	109
GALINE (L.). — Eclairage	334
GATEAU (E.). — Nouvelles installations de la Centrale d'Issy-les-Moulineaux....	109
HEINRICH (W.). — Das Bürstein problem im Elektro Maschinenbau	222
HOLVERDO (K.). — Contrôle et mesure de l'efficacité des traitements par le chlore	460
IZART (J.). — Agenda Dunod 1930	584
IZART (J.). — Physique industrielle	222
<i>Jahre Elektrotechnischer Verein 1879-1929 (50)</i>	460
JANET (Maurice). — Leçons sur les systèmes d'équations aux dérivées partielles.	804
JEFFREYS (Harold). — Operational Methods in Mathematical physics	803
JELLIOT. — Deux heures de physique	803
JOLLY (Pierre). — Nouveau régime légal des Distributions d'énergie élec- trique	222, 586
JOUET (Maurice). — Leçons sur les systèmes d'équations aux dérivées par- tielles	223
JULLIEN (Lieutenant-Colonel). — Conférences d'actualités scientifiques et indus- trielles	580, 804
JUMAU (L.). — Manuel pratique du monteur électricien	1261
KLINKENBERG (A.). — Equilibre de la Constitution de la matière.....	460
KURT ARNDT (Dr). — Technische Elektrochemie	108, 461
LAFFARGUE. — Manuel pratique du monteur électricien	1261
LAGRON. — Appareillage électrique	1261
LEBLANC (Maurice). — Décharge électrique dans le vide et dans les gaz....	460, 806
LEBLANC (Maurice). — Décharge électrique dans le vide et dans les gaz....	460, 806
LE CADRE (Maurice). — Exécution des enroulements des machines tripha- sées	333, 1026
LEMOINE (Jules). — Traité de Physique générale et expérimentale Mécanique- Chaleur, année 1930	460
LEMOINE (Jules). — Traité de Physique générale et expérimentale	808
LOMBARDI (Luigi). — Principii scientifici di elettrotecnica	582
LOMBARDI (Luigi). — Corso teorico pratico di Elettrotecnica	582
LUMDBY (J.-T.). — Den Polytekniske Laereantsalt	460
MALEGARIE (Ch.). — Nouvelles installations de la Centrale d'Issy-les-Mouli- neaux	109
MALLET (E.). — Telegraphy and Telephony	108, 335
MAREC (E.). — Electricité à la Maison	110
MELOT (Léon). — Guide de l'Ingénieur Techno-Comptable	223, 583
MERCY (P.). — Le système de télégraphie Baudot et ses applications.....	333, 697
MESNY (R.). — Conférences d'actualités scientifiques et industrielles	580, 804
MESTRE (Achille). — Jurisprudence de la Houille Blanche	222, 585

	PAGES
MESTRE (Achille). — Propriétaires et Compagnies de distribution d'énergie électrique	222, 586
NANPON (R.). — Nouvelles installations de la Centrale d'Issy-les-Moulineaux..	109
PACOTTE (Julien). — Méthodes nouvelles en Analyse quantitative (Mécanique quantique, Mécanique ondulatoire)	333, 699
PAINLEVÉ (Paul). — Leçons sur la Résistance des fluides non visqueux....	696, 806
PARESY (R.). — Installations téléphoniques	580, 923
PARODI (H.). — Electrification partielle du réseau de la Compagnie d'Orléans	108, 334
PETIT (G.-E.). — La télégraphie sans fil, la téléphonie sans fil	333, 697
PRUNIER (F.). — Newton, Maupertuis et Einstein	462
RIGAUD (G.). — Conférences d'actualités scientifiques et industrielles	580, 804
RIMAIIHO (Lieutenant-Colonel). — Etablissement des prix de revient.....	333
ROY (Maurice). — L'aérodynamique des ailes sustentatrices et des hélices.	803, 811
SAINT-PAUL (B.). — Eclairage	334
SEVIN (E.). — Temps absolu et l'espace à quatre dimensions	805
SEVIN (Emile). — Gravitation, Lumière et Electromagnétisme	803, 1027
Société Amicale de Secours des Anciens Elèves de l'Ecole Polytechnique (Annuaire 1929 de la)	222
TARTINVILLE (J.). — Comptage de l'Energie électrique en courants alternatifs	333, 924
TCHERNOFF (J.). — Syndicats financiers	696, 806
THOMSON (J.-J.). — Structure de la lumière	333, 697
THOVERT. — Photographie des couleurs	1261
TISSERAND. — Oeuvres de Maine de Biran	1261
TORRESI (R.). — Nouvelles installations de la Centrale d'Issy-les-Moulineaux..	109
TRIBOT-LASPIERE (Jean). — Conférence internationale des Grands Réseaux Electriques à haute tension	803, 810
TURPAIN (Albert). — Leçons élémentaires de Physique	580, 807
Union des Syndicats de l'Electricité année 1929 (Annuaire)	108
Université de l'Enseignement français (Annuaire général de l')	803
VALBREUZE (Robert DE). — Principes et applications de l'Eclairage	334
VAN LOON. — Etudes analytiques au sujet des combinaisons de quelques graisses imparfaitement connues	460
VAN NIEL (C.-B.). — The propionic acid Bacteria	460
VAN ROO (D.-J.). — Formation des acétates cycliques de la glycérine au moyen de l'acétal	460
VOLKRINGER (H.). — Etapes de la Physique	580
VEAUX (M.). — Cours d'Electricité	108, 582
VILLAT (Henri). — Leçons sur l'Hydrodynamique	696, 806
WERNER (Dr Otto). — Empfindliche Galvanometer	581
WILCOX. — La Vapeur	461

IL Y A TRENTE ANS

ABRAHAM. — La stérilisation des eaux potables par l'ozone	1262
ALIAMET. — Appareils électriques de mesure figurant à l'Exposition universelle de 1900	812
ARMAGNAT. — Les phasemètres industriels.....	1344
BOCHET. — Lampes à arc à bas voltage.....	221
CLAUDE (G.). — Quelques idées nouvelles sur le mécanisme de l'électrolyse par les courants de retour des transmissions	700
CUENOD. — Distribution de la force à de grandes distances par l'électricité, au moyen du courant continu à intensité constante	112
GOSSELIN (X.). — Tramway électrique du Bois de Boulogne à traction mixte par trolley et contacts superficiels système Vedovelli	336
GUENEE. — Les applications industrielles des électro-aimants	1344
LANGEVIN. — Les ions dans les gaz	584
LENART (DE). — Nouvelles lampes à arc à courant alternatif	700
VEDOVELLI. — Appareillage électrique pour 3 000 V	221
VILLARD (P.). — Les rayons cathodiques et les rayons de Roentgen	461
ZETTER. — Appareillage pour circuits de haute tension	336

3d Pa.
Gen.

v

c

R

o

p

ct

s

t

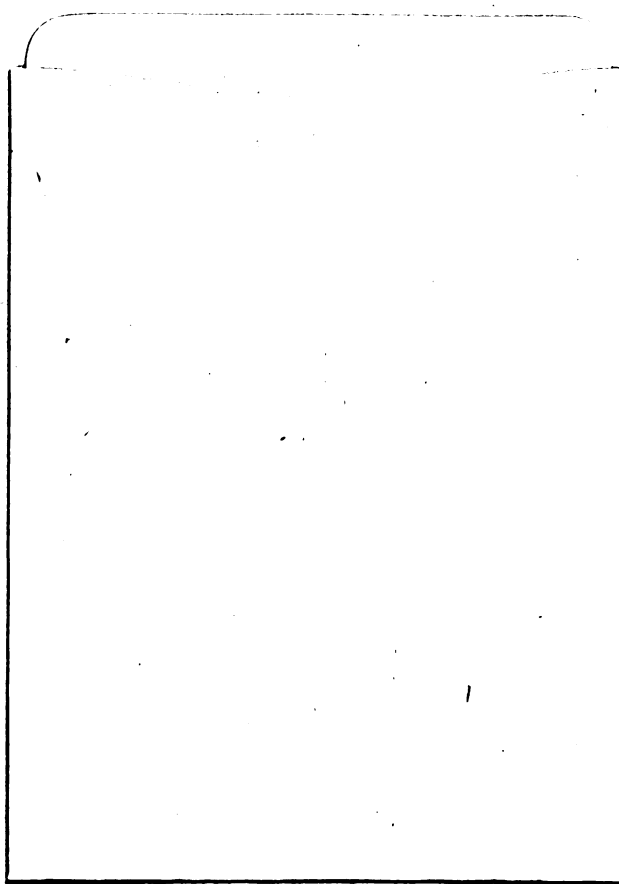
a

sh

ca

Date Due

[illegible]



The Ohio State University



3 2435 06228958 2

OHIO STATE UNIVERSITY BOOK DEPOSITORY



8 03 12 28 8 04 010